

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



**Índices de Vulnerabilidade à Contaminação de Massas de Água
Subterrânea: aplicação à delimitação da Rede Ecológica
Nacional no Concelho de Almada (Portugal)**

Laura Sofia Barradas Simas

Dissertação
Mestrado em Geologia Aplicada
Especialização em Hidrogeologia

2014

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



**Índices de Vulnerabilidade à Contaminação de Massas de Água
Subterrânea: aplicação à delimitação da Rede Ecológica
Nacional no Concelho de Almada (Portugal)**

Laura Sofia Barradas Simas

Dissertação
Mestrado em Geologia Aplicada
Especialização em Hidrogeologia

Orientadora: Professora Doutora Maria Catarina Rosalino da Silva

2014

Agradecimentos

Queria agradecer em primeiro lugar à Professora Doutora Catarina Silva por me ter dado a conhecer este tema e pelo apoio prestado em todas as fases da elaboração desta dissertação e à Professora Doutora Rosário Carvalho pela preocupação e ajuda prestada em relação aos pontos de água.

À Câmara Municipal de Almada na pessoa da Dra. Patrícia Silva pela cedência de material em tempo útil, bem como pelo esclarecimento de dúvidas.

Ao Professor Doutor Rui Taborda pela ajuda prestada no tratamento dos dados. Sem essa ajuda teria sido impossível a conclusão desta dissertação. Obrigado por me fazer pensar e ajudar-me a concentrar nas soluções em vez dos problemas.

Ao Professor Luís Ribeiro pelo pronto esclarecimento de dúvidas sobre o parâmetro uso do solo.

Ao Doutor Manuel Mendes de Oliveira do Laboratório Nacional de Engenharia Civil que se prontificou a receber-me para efectuar o cálculo da recarga, bem como a explicar-me o funcionamento do programa, bem como à Catarina Caria pela cedência dos dados de base.

Ao Centro de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa na pessoa do Manuel de Vasconcelos pela ajuda prestada na cedência do modelo digital de terreno.

À Ana Jesus Dias minha grande amiga e confidente que acreditou em mim até ao fim e que me mostrou que não há impossíveis. Admiro-te imenso!

À minha mãe e ao meu irmão porque sem eles não seria quem sou.

E essencialmente a toda a gente que ao perguntarem por esta dissertação me incentivaram a continuar e não desistir. Embora sejam demasiadas pessoas para referir aqui todas elas têm um espacinho no meu coração.

Índice

Agradecimentos	i
Índice	ii
Índice de Tabelas	iv
Índice de Figuras	v
Abreviaturas	vi
Resumo	1
Abstract	2
1. Introdução	3
1.1 Índices de vulnerabilidade	3
1.2 Rede Ecológica Nacional	5
1.3 Estrutura e organização da dissertação	7
2. Enquadramento da área em estudo	8
2.1 O concelho de Almada	8
2.1.1 Enquadramento Geográfico e Administrativo	8
2.1.2 Enquadramento Cartográfico	9
2.1.3 Enquadramento Geológico	10
2.1.4 Enquadramento Geomorfológico e Tectónico	15
2.1.5 Enquadramento Climático	16
2.1.6 Enquadramento Hidrológico	18
2.1.7 Enquadramento Hidrogeológico	20
3. Descrição dos parâmetros utilizados e sua influência na vulnerabilidade à contaminação de massa de água subterrânea	23
3.1 Profundidade do nível da água	23
3.2 Recarga	24
3.3 Geologia da formação aquífera	25
3.4 Tipo de solo	26
3.5 Topografia	27
3.6 Influência da zona não saturada (zona vadosa)	28
3.7 Condutividade hidráulica	30
3.8 Ocupação (uso) do solo	30
4. Dados de base	32
5. Tratamento dos dados	34
5.1 Preparação dos dados de base	34
5.2 Tratamento dos dados em SIG	35

5.2.1 Dados Vectoriais	35
5.2.2 Dados Matriciais	36
6. Resultados	39
7. Discussão dos resultados	43
8. Conclusões	46
9. Trabalhos futuros	48
Bibliografia	49
Anexo 1 - Modelo digital de terreno para o Concelho de Almada e mapa de declives	52
Anexo 2 - Inventário de pontos de água e pontos de água com informação relevante e distribuição da profundidade do nível da água no Concelho de Almada	54
Anexo 3 - Recarga (dados de base)	57
Anexo 4 - Carta de solos e respectiva legenda	58
Anexo 5 - Resultados: Profundidade do Nível da Água	60
Anexo 6 - Resultados: Recarga	62
Anexo 7 - Resultados: Geologia da Formação Aquífera	64
Anexo 8 - Resultados: Tipo de solo	66
Anexo 9 - Resultados: Topografia (declives)	67
Anexo 10 - Resultados: Influência da Zona Vadosa	69
Anexo 11 - Resultados: Condutividade Hidráulica	70
Anexo 12 - Resultados: Uso do solo	71

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Peso dos parâmetros no cálculo do índice DRASTIC (Aller, L., 1987)	4
Tabela 2 - Peso dos parâmetros no cálculo do índice IS (Ribeiro, L., 2005)	5
Tabela 3 - Peso dos parâmetros no cálculo do índice IS segundo a Resolução de Conselho de Ministros 81/2012.	7
Tabela 4 - Dados relativos á população do Concelho de Almada (fonte: Instituto Nacional de Estatística <i>in</i> Pordata)	8
Tabela 5 - Sumário das características do aquífero superficial na região em estudo (fonte: Almeida, C., 2000).	21
Tabela 6 - Sumário das características do aquífero miocénico na região em estudo. (fonte: Almeida, C., <i>et al</i> , 2000).	21
Tabela 7 - Ponderação para o parâmetro profundidade do nível da água para os índices DRASTIC (Aller, L., <i>et al</i> , 1987) e IS (Ribeiro, L., 2005).	24
Tabela 8 - Ponderação para o parâmetro profundidade do nível da água para o índice IS segundo a Resolução de Conselho de Ministros 81/2012.	24
Tabela 9 - Ponderação para o parâmetro recarga para os índices DRASTIC (Aller, L., <i>et al</i> , 1987) e IS (Ribeiro, L., 2005).	25
Tabela 10 - Ponderação para o parâmetro recarga água para o índice IS segundo a Resolução de Conselho de Ministros 81/2012.	25
Tabela 11 - Ponderação para o parâmetro geologia da formação aquífera para os índices DRASTIC (Aller, L., <i>et al</i> , 1987) e IS (Ribeiro, L., 2005).	26
Tabela 12 - Ponderação para o parâmetro geologia da formação aquífera para o índice IS segundo a Resolução de Conselho de Ministros 81/2012.	26
Tabela 13 - Ponderação para o parâmetro tipo de solo para o índice DRASTIC (Aller, L., <i>et al</i> , 1987).	27
Tabela 14 - Ponderação para o parâmetro topografia para os índices DRASTIC (Aller, L., <i>et al</i> , 1987) e IS (Ribeiro, L., 2005).	28
Tabela 15 - Ponderação para o parâmetro topografia para o índice IS segundo a Resolução de Conselho de Ministros 81/2012.	28
Tabela 16 - Ponderação para o parâmetro influência da zona não saturada (zona vadosa) para o índice DRASTIC (Aller, L., <i>et al</i> , 1987)	29
Tabela 17 - Ponderação para o parâmetro condutividade hidráulica para o índice DRASTIC (Aller, L., <i>et al</i> , 1987)	30
Tabela 18 - Ponderação para o parâmetro uso do solo para o índice IS (Ribeiro, L., 2005).	31
Tabela 19 - Condutividade hidráulica das formações presentes na área em estudo (fonte: Domenico & Schwartz, 1998 e Almeida, 2000).	35
Tabela 20 - Erro associado às zonas sem recarga calculada.	44
Tabela 21 - Tabela sumário das diferenças entre índices.	46

Índice de Figuras

Figura 1 - Enquadramento Geográfico _____	9
Figura 2 - Carta Geológica do Concelho de Almada _____	10
Figura 3 - Legenda da Carta Geológica do Concelho de Almada _____	11
Figura 4 - Perfil NS da área em estudo segundo Simões (1998) _____	12
Figura 5 - Variáveis climatológicas para o Concelho de Almada (adaptado de: Atlas do Ambiente digital) _____	17
Figura 6 - Bacias hidrográficas do Concelho de Almada (fonte: Câmara Municipal de Almada) _____	19
Figura 7 - Unidades hidrogeológicas de Portugal Continental (adaptado de: Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos) _____	20
Figura 8 - Relação entre nível hidrostático (NHE) e profundidade do nível da água numa captação de água subterrânea _____	23
Figura 9 - Esquema simplificado de um perfil vertical do terreno onde exista um aquífero livre (adaptado de Aller, L., <i>et al</i> , 1987) _____	29
Figura 10 - Representação de dados geográficos nos diferentes formatos de dados (adaptado de <i>ArcGIS online help</i>). _____	36
Figura 11 - A função de reclassificação (adaptado de <i>ArcGIS online help</i>). ____	37
Figura 12 - Transformação de coordenadas de sete parâmetros. (fonte: <i>ArcGIS online help</i>). _____	38
Figura 13 - Resultados obtidos com o índice DRASTIC (Aller, L., 1987). _____	40
Figura 14 - Resultados obtidos com o índice de susceptibilidade (Ribeiro, L., 2005). _____	41
Figura 15 - Resultados obtidos com o índice de susceptibilidade calculado segundo a Resolução de Conselho de Ministros 81/2012. _____	42

Abreviaturas

IS - Índice de Susceptibilidade

REN - Reserva Ecológica Nacional

SIG - Sistemas de Informação Geográfica

Resumo

A Reserva Ecológica Nacional (REN) é um instrumento de gestão territorial que permite salvaguardar a estrutura ecológica de uma região.

Uma das tipologias a incluir em REN são as “áreas estratégicas de protecção e recarga de aquíferos” que são definidas a partir de índices de vulnerabilidade à contaminação, como o índice de susceptibilidade, existindo, no entanto outros índices para avaliação da vulnerabilidade dos aquíferos á contaminação.

Partindo da definição da REN para a tipologia “áreas estratégicas de protecção e recarga de aquíferos” para o Concelho de Almada efectuou-se uma comparação dos métodos de avaliação da vulnerabilidade à contaminação de massas de água subterrânea (DRASTIC (Aller, L., 1987), IS (Ribeiro, L., 2005) e IS segundo a Resolução de Conselho de Ministros 81/2012).

O estudo envolveu a recolha de dados para os vários parâmetros dos índices estudados (geologia da formação aquífera, profundidade do nível da água, recarga, topografia, tipo de solo, influência da zona vadosa, condutividade hidráulica e uso do solo) bem como o seu tratamento utilizando um programa de tratamento de dados geográficos (ESRI ArcGIS versão 10.1, 2012).

Da comparação entre os três índices utilizados conclui-se que, por norma, os valores mais baixos de vulnerabilidade se encontram na zona nordeste do concelho, associados a zonas com maior elevação. Tal não se verifica no índice de susceptibilidade calculado pelo método de Ribeiro (2005) o que parece indicar a grande influência do parâmetro uso do solo na vulnerabilidade.

Palavras-chave: Almada, aquífero, contaminação, DRASTIC, hidrogeologia, IS, REN, vulnerabilidade.

Abstract

The National Ecological Reserve (NER) is a land management tool that allows the safeguard of the ecological structure of a region.

One of the typologies to include in NER is the "strategic areas of protection and aquifer recharge" which are defined by vulnerability indexes to groundwater contamination, such as the susceptibility index. There are however other indexes to assess the vulnerability of aquifers to contamination.

Starting from the definition of the NER for the typology "strategic areas of protection and aquifer recharge" for the Almada Municipality a comparison of methods for assessing the vulnerability to contamination of groundwater bodies is made using different indexes (DRASTIC (Aller, L., *et al*, 1987), IS (Ribeiro, L., 2005) and IS according to the Council of Ministers Resolution 81/2012).

The study involved the collection of data for the various parameters of the indexes studied (geology of the aquifer formation, depth of the water level, recharge, topography, soil type, influence of the vadose zone, hydraulic conductivity and land use) as well as its treatment using a program for the treatment of spatial data (ESRI ArcGIS version 10.1, 2012).

Comparing the three indexes is concluded that, as a rule, lower values of vulnerability are in the northeastern area of the municipality, associated with areas of higher elevation. Is it not the case in the susceptibility index calculated by the method of Ribeiro (2005) which seems to indicate the greater influence of using the land use parameter in vulnerability calculations.

Key-words: Almada, aquifer, contamination, DRASTIC, hydrogeology, IS, REN, vulnerability.

1. Introdução

A água subterrânea é em muitas regiões do globo terrestre a principal fonte de água potável, sendo estimado que constitui cerca de 30% das reservas de água doce e 99% das reservas de água doce no estado líquido (Serrano, S., 1997).

A distribuição dos recursos hídricos subterrâneos em Portugal continental é bastante influenciada pelo contexto geológico em que ocorrem. Assim sendo, a maior concentração de massas de água com potencial de exploração ocorre nas orlas maioritariamente constituídas por rochas sedimentares. No Maciço Antigo onde predominam rochas eruptivas e metassedimentares os recursos subterrâneos são escassos, exceptuando-se os recursos associados a maciços carbonatados.

A existência de legislação para a protecção e valorização dos recursos hídricos subterrâneos faz com que seja necessário o desenvolvimento de métodos expeditos e de fácil aplicação, para avaliar a vulnerabilidade à contaminação das massas de água subterrânea que pode ser proveniente de diversas fontes.

A noção de massa de água que vem substituir a noção de bacia hidrográfica (Decreto-Lei 58/2005 de 29 de Dezembro - Lei da Água) permite a individualização de massas de água subterrânea que se podem inserir em mais do que uma bacia hidrográfica, tornando mais eficaz o planeamento e gestão de acções que visem minimizar a influência antrópica no meio natural, bem como definir políticas de desenvolvimento sustentável.

A presente dissertação tem como objectivo mostrar os passos necessários aos cálculos dos índices propostos - DRASTIC (Aller, L., *et al*, 1987), IS (Ribeiro, L., 2005) e IS segundo a Resolução de Conselho de Ministros 81/2012 - bem como relacionar os índices citados com a delimitação da Rede Ecológica Nacional para a tipologia “áreas estratégicas de protecção e recarga de aquíferos”. Pretende-se ainda comparar os métodos utilizados tendo em conta os resultados obtidos e facilidade de aplicação, tendo por base metodologias SIG para o tratamento dos dados utilizando o programa ArcGIS (ESRI, versão 10.1, 2012).

1.1 Índices de vulnerabilidade

Os índices de vulnerabilidade à poluição de massas de água subterrâneas são um instrumento útil na tomada de decisão relativa ao ordenamento do território, pois permitem aos decisores políticos a percepção concreta da vulnerabilidade do meio em que se insere a sua esfera de actuação.

A vulnerabilidade é definida como “o grau da potencial susceptibilidade da água subterrânea a uma fonte de poluição tónica ou difusa” (Ribeiro, L., 2005), podendo ser de dois tipos:

- **Vulnerabilidade intrínseca** (cf. COST620, 2001 *in* Ribeiro, L. 2005) aquela que toma em conta unicamente as características geológicas, hidrológicas e

hidrogeológicas do meio, sendo por isso independente do tipo de poluente gerado pelas actividades antropogénicas;

- **Vulnerabilidade específica** que considera também as propriedades de um poluente específico e as suas relações com as componentes de vulnerabilidade intrínseca.

O índice DRASTIC foi desenvolvido na década de 80 pelo *National Water Well Association* em conjunto com a *U.S. Environmental Protection Agency* (EPA) nos Estados Unidos da América com o objectivo de auxiliar a gestão e protecção das águas num país em que as necessidades hídricas começaram a ser suprimidas cada vez mais por recursos subterrâneos. Este índice foi criado para permitir a pessoas com conhecimento limitado de hidrogeologia uma maneira expedita de avaliar o potencial de contaminação das águas subterrâneas numa determinada área.

Este índice corresponde a um índice puramente intrínseco e considera um conjunto de sete parâmetros que são usados para o cálculo da vulnerabilidade (a ponderação de cada parâmetro é apresentada no capítulo 3). A apresentação de cada parâmetro bem como a fórmula de cálculo final com os pesos de cada parâmetro no cálculo final é apresentada a baixo (tabela 1):

- *Depth to water* (D) – profundidade do nível da água;
- *Recharge* (R) – recarga;
- *Aquifer media* (A) – geologia da formação aquífera (litologia);
- *Soil media* (S) – tipo de solo;
- *Topography* (T) – topografia (declives);
- *Impact of Vadose Zone* (I) – impacto da zona não saturada (ou zona vadosa);
- *Hydraulic Conductivity* (C) – condutividade hidráulica.

Tabela 1 - Peso dos parâmetros no cálculo do índice DRASTIC (Aller, L., 1987)

Parâmetro	D	R	A	S	T	I	C
Factor de ponderação	5	4	3	2	1	5	3

$$\text{DRASTIC} = D*5 + R*4 + A*3 + S*2 + T + I*5 + C*3$$

O índice DRASTIC mostrou ter vários problemas na sua aplicação, pois além de haver redundância de parâmetros também utiliza um sistema de ponderação arbitrário e a experiência tem mostrado que os índices de vulnerabilidade têm em geral melhores desempenhos quando englobam também informação sobre a ocupação do solo e/ou actividades antrópicas associadas, como por exemplo o tipo e a natureza das práticas agrícolas.

O Índice IS vem deste modo tentar resolver os problemas encontrados na aplicação do DRASTIC pois além de deixar de fora os parâmetros S, I e C (considerados redundantes em relação ao parâmetro A) também introduz o parâmetro LU (land use – ocupação do solo). A ponderação dos parâmetros (apresentada no capítulo 3) foi também reformulada através do resultado de um inquérito feito a um grupo de especialistas de diversas áreas da Hidrogeologia e Recursos Hídricos.

A apresentação de cada parâmetro bem como a fórmula de cálculo final com os pesos de cada parâmetro no cálculo final é apresentada a baixo (tabela 2):

- *Depth to water* (D) – profundidade do nível da água;
- *Recharge* (R) – recarga;
- *Aquifer media* (A) – geologia da formação aquífera (litologia);
- *Topography* (T) – topografia (declives);
- *Land Use* (LU) - ocupação (uso) do solo.

Tabela 2 - Peso dos parâmetros no cálculo do índice IS (Ribeiro, L., 2005)

Parâmetro	D	R	A	T	LU
Factor de ponderação	0.186	0.212	0.259	0.121	0.222

$$IS = D*0.186 + R*0.212 + A*0.259 + T*0.121 + LU*0.222$$

1.2 Rede Ecológica Nacional

A Rede Ecológica Nacional (REN) estabelecida pela primeira vez no ano de 1983 constitui um instrumento fundamental do ordenamento do território à escala nacional, constituindo uma restrição de utilidade pública que “integra todas as áreas indispensáveis à estabilidade ecológica do meio e à utilização racional dos recursos naturais” (Decreto-Lei 321/1983 de 5 de Julho), devendo ser estabelecida a nível municipal para a totalidade do território continental.

Para efeitos da presente dissertação a tipologia da REN considerada foi as “áreas estratégicas de protecção e recarga de aquíferos” que, segundo o Decreto-Lei 239/2012 de 2 de Novembro correspondem às “áreas geográficas que, devido à natureza do solo, às formações geológicas aflorantes e subjacentes e à morfologia do terreno, apresentam condições favoráveis à ocorrência de infiltração e recarga natural dos aquíferos e se revestem de particular interesse na salvaguarda da quantidade e qualidade da água a fim de prevenir ou evitar a sua escassez ou deterioração”. Na legislação anterior estas áreas correspondem às zonas de máxima infiltração e cabeceiras de linhas de água.

A determinação destas áreas poder ser efectuada de duas maneiras:

- Utilizando modelos numéricos de escoamento que correspondem a modelos que simulam as condições naturais e permitem definir as zonas de recarga e descarga dos aquíferos (situação preferencial);
- Utilizando índices de vulnerabilidade à contaminação que dependerão do tipo de aquífero a estudar (poroso, cárstico, fissurado ou misto).

A utilização de modelos de numéricos de escoamento constitui a situação preferencial para a definição da REN para a tipologia “áreas estratégicas de protecção e recarga de aquíferos”, pois estes modelos permitem a simulação do comportamento hidrodinâmico do aquífero, sendo realizados e calibrados com dados físicos do terreno e modelos conceptuais do aquífero (Resolução de Conselho de Ministros 81/2012). No entanto, actualmente, a maioria das massas de água subterrâneas não possuem modelos numéricos calibrados nem modelos conceptuais da sua dinâmica, o que faz com que a utilização de índices de vulnerabilidade seja importante, uma vez que “as áreas mais vulneráveis são também as áreas mais permeáveis que alimentam o aquífero, com maior impacto para a qualidade da água subterrânea” (Resolução de Conselho de Ministros 81/2012).

À data da realização desta dissertação a legislação em vigor respeitante à REN era a seguinte:

- Decreto-Lei 239/2012 de 2 de Novembro - procede à primeira alteração ao Decreto-Lei 166/2008 de 22 de agosto, que estabelece o Regime Jurídico da REN;
- Portaria 419/2012 de 20 de Dezembro - são definidas as situações de usos ou ações considerados compatíveis com os objectivos de protecção ecológica e ambiental e de prevenção e redução de riscos naturais de áreas integradas nas diversas tipologias da REN;
- Resolução de Conselho de Ministros 81/2012 - aprova as orientações estratégicas de âmbito nacional e regional, que consubstanciam as diretrizes e critérios para a delimitação das áreas integradas em REN;
- Declaração de Retificação 71/2012 - corresponde a uma correcção de inexactidões presentes na Resolução de Conselho de Ministros 81/2012.

A apresentação de cada parâmetro bem como a fórmula de calculo final com os pesos de cada parâmetro no cálculo final é apresentada a baixo (tabela 3):

- *Depth to water* (D) – profundidade do nível da água;
- *Recharge* (R) – recarga;
- *Aquifer media* (A) – geologia da formação aquífera (litologia);
- *Topography* (T) – topografia (declives);

Tabela 3 - Peso dos parâmetros no cálculo do índice IS segundo a Resolução de Conselho de Ministros 81/2012.

Parâmetro	D	R	A	T
Factor de ponderação	0.24	0.27	0.33	0.16

$$IS = D*0.24 + R*0.27 + A*0.33 + T*0.16$$

No enquadramento hidrogeológico da zona em estudo será mostrado que a zona referida corresponde a parte de um sistema aquífero essencialmente poroso, por isso só será abordado o índice de vulnerabilidade constante da legislação para este tipo de aquífero que corresponde ao índice IS (Ribeiro, L., 2005) adaptado às especificidades da REN, sendo que serão incluídas na REN potencial (independente das exclusões á REN devido a usos pré-existentes) todas as áreas cujo índice IS seja superior a 70 (Resolução de Conselho de Ministros 81/2012).

A principal adaptação do índice proposto é a retirada do parâmetro “Uso do solo” pois a REN é potencial, ou seja, independente do uso do solo num determinado local num determinado intervalo temporal.

1.3 Estrutura e organização da dissertação

A presente dissertação pretende mostrar as etapas necessárias à aplicação dos índices de vulnerabilidade à definição de REN no Concelho de Almada. Assim sendo será efectuado um enquadramento da área em estudo bem como uma apresentação dos parâmetros e dados de base necessários à sua definição. Serão apresentados também os métodos utilizados no tratamento dos dados de base, os resultados obtidos e respectiva discussão dos mesmos. Na discussão dos resultados pretende-se efectuar ainda uma comparação dos índices em termos de resultados obtidos e facilidade de aplicação.

2. Enquadramento da área em estudo

2.1 O concelho de Almada

2.1.1 Enquadramento Geográfico e Administrativo

O concelho de Almada situa-se na região centro de Portugal Continental na margem esquerda do Rio Tejo (região noroeste da Península de Setúbal) pertencendo ao Distrito de Setúbal (ver figura 1). Com a reorganização administrativa de 2013 passou de 11 a 5 freguesias, (Costa da Caparica, união das freguesias de Caparica e Trafaria, união das freguesias de Charneca de Caparica e Sobreda, união das freguesias de Almada, Cova da Piedade, Pragal e Cacilhas e união das freguesias do Laranjeiro e Feijó) numa área total de 70.2 km².

Tem fronteira a norte com o Rio Tejo, a oeste com o oceano Atlântico, a sul com o concelho de Sesimbra e a este com o concelho do Seixal.

Segundo dados do Instituto Nacional de Estatística (INE) em colaboração com outras fontes os dados relativos à população serão apresentados na tabela 4:

Tabela 4 - Dados relativos á população do Concelho de Almada (fonte: Instituto Nacional de Estatística in Pordata)

População residente (2009)	172.394 habitantes
Densidade populacional (2009)	2.456 habitantes/km ²
Percentagem da população servida por ETAR (2009)	96%
Percentagem da população servida por sistema público de abastecimento de água (2009)	100%
Rácio de água distribuída/consumida por habitante (2009)	103,7
Resíduos urbanos recolhidos por habitante (2009)	639,8 kg/habitante

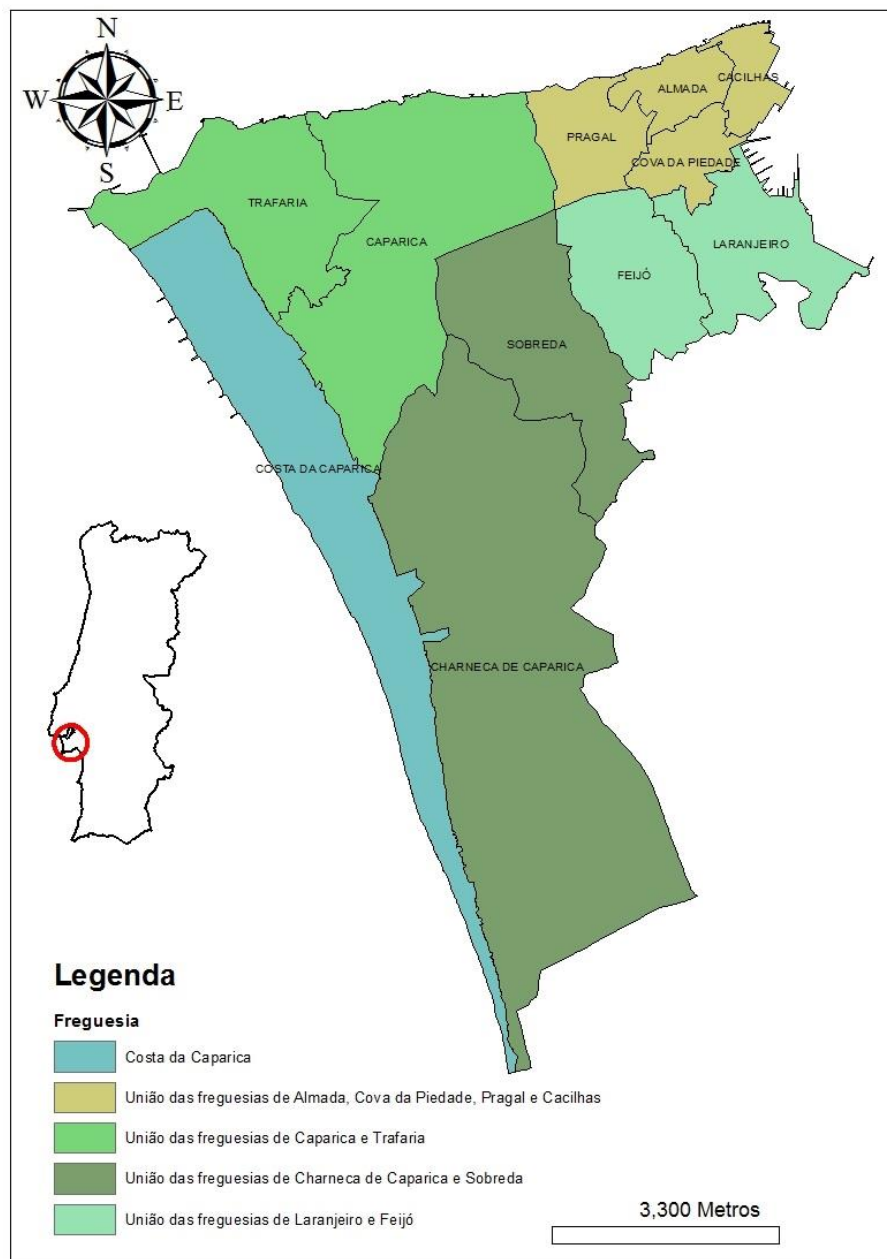


Figura 1 - Enquadramento Geográfico

2.1.2 Enquadramento Cartográfico

A região em estudo encontra-se descrita na seguinte cartografia:

- Folhas 34-C (Cascais), 34-D (Lisboa) e 38-B (Setúbal) da Carta Geológica de Portugal na escala 1:50.000 dos Serviços Geológicos de Portugal;
- Folhas 431 (Lisboa), 441-B (Costa da Caparica), 442 (Barreiro) e 453 (Fernão Ferro – Sesimbra) da Carta Topográfica na escala 1:25.000 do Instituto Geográfico do Exército;
- Folhas 34-C, 34-D e 38-B da Carta Corográfica de Portugal na escala 1:50.000 do Instituto Geográfico Português.

2.1.3 Enquadramento Geológico

A região em estudo encontra-se abrangida por três folhas da Carta Geológica de Portugal na escala 1:50.000. As figuras 2 e 3 mostram a carta geológica, em formato SIG cedida pela Câmara Municipal de Almada, e a respectiva legenda que foram utilizadas para a presente dissertação.

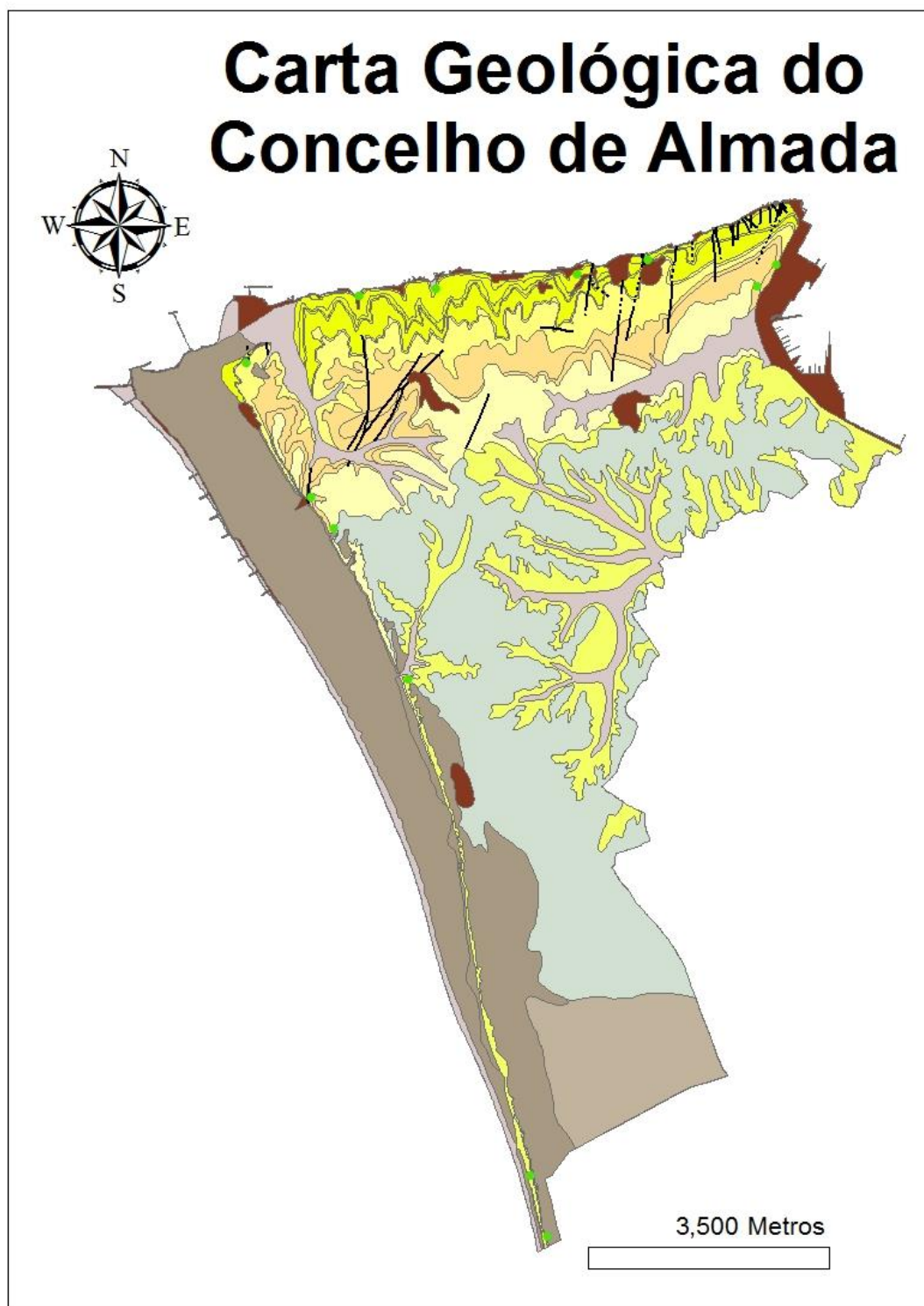


Figura 2 - Carta Geológica do Concelho de Almada

Legenda

- Sítios com interesse geológico
- Falha provável
- Falha

Geologia



Litologia

- Aterros
- Aluviões
- Areias de praia
- Areias de duna
- Depósito de vertente
- Dunas
- Conglomerado de Belverde
- Areias de Santa Marta
- Areolas com "*Flabellipecten tenuisulcatus*" de Braço de Prata e Areolas com "*Chlamys macrotis*" de Cabo Ruivo
- Grés com "*Schizaster scillae*" de Grilos e Calcários com "*Pycnodonta squarrosa*" de Marvila
- Argilas azuis de Xabregas
- Areias do Vale de Chelas e Calcários com fósseis espáticos e "*Anomia choffati*" de Quinta das Conchas
- Calcário com "*Chlamys scabriuscula*" de Musgueira
- Areias com "*Placuna mioenica*"
- Calcário com "*Chlamys scabrella*" de Casal Vistoso
- Areias da Quinta do Bacalhau
- Argilas azuis do Forno do Tijolo
- Calcários de Entrecampos (Banco Real)
- Areolas com "*Chlamys pseudo-pandorae*" da Estefânia

Figura 3 - Legenda da Carta Geológica do Concelho de Almada

A região em estudo situa-se na Orla Ocidental Portuguesa, sendo formada essencialmente por formações sedimentares do Miocénico na zona mais a norte do Concelho e formações do pliocénico e plio-plistocénico na zona sul, existindo ainda depósitos de cobertura recentes.

Simões (1998) apresenta um perfil da região em estudo que se apresenta na figura 4.

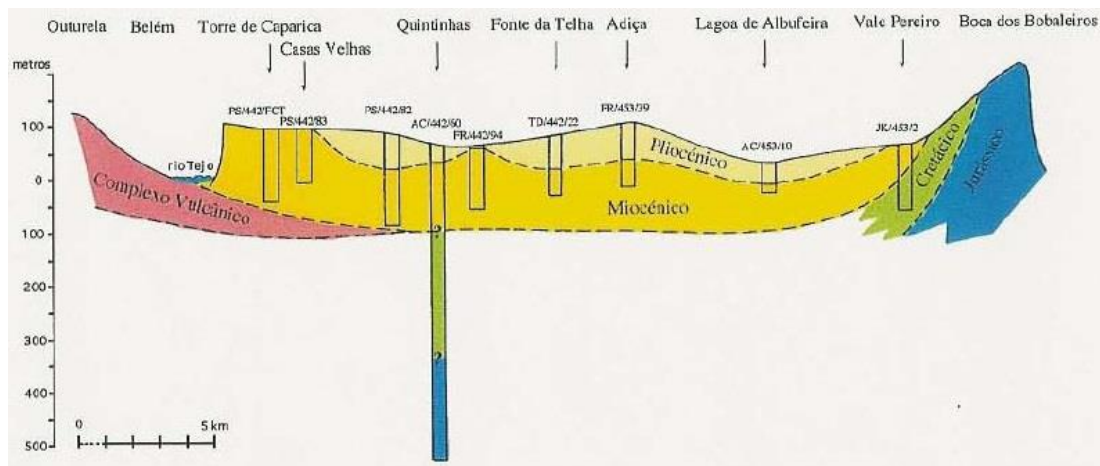


Figura 4 - Perfil NS da área em estudo segundo Simões (1998)

A descrição das formações presentes na área em estudo foi baseada essencialmente na Notícia Explicativa da Folha 34-D (Pais, *et al*, 2006).

Formações do Miocénico

Burdigaliano

- **Areolas da Estefânia (M_{Es})** - são constituídas por areias finas, areias argilosas, argilitos e alguns bancos de biocalcarenitos. No Concelho de Almada afloram entre a região oeste de Cacilhas até à Trafaria, estando no entanto representadas em várias sondagens sendo constituída por “conglomerados médios, muito fossilíferos na base, que passam a arenitos finos a médios e a argilitos e, de novo, a arenitos com intercalações de biocalcarenitos, de cor predominante cinzento esverdeado” (Pais, *et al*, 2003 *in* Pais, *et al*, 2006);
- **Calcários de Entrecampos - “Banco Real” (M_{Ec})** - são representados por biocalcarenitos com fracção detrítica abundante, às vezes argilosos, ricos de moldes e/ou de fragmentos de moluscos passando superiormente a areias muito finas e a siltitos argilosos de cor cinzenta, da unidade seguinte. Afloram entre Cacilhas e a Trafaria um pouco acima do nível de maré alta do rio Tejo com uma espessura de cerca de 10 metros, sendo representado em sondagem por biocalcarenitos cinzentos esverdeados com fragmentos de corais e abundantes moluscos, em regra bastante fragmentados. Assentam em desconformidade sobre as Areolas da Estefânia;
- **Argilas de Forno do Tijolo (M_{Ft})** - são constituídas por areias finas argilosas, piritosas, de cor cinzento azulado com moluscos, peixes e abundantes microfósseis. Correspondem à maior transgressão do Burdigaliano. A parte superior revela decréscimo de salinidade (macrofósseis vegetais, *Cerithium* e outros moluscos) e de profundidade (Antunes, *et al*, 1973 *in* Pais, *et al*, 2006). Afloram entre as proximidades de Cacilhas e a Trafaria sendo representadas em sondagem por arenitos finos e siltitos cinzento esverdeados, com alguns bancos de argilitos e de biocalcarenitos, em regra muito fossilíferos;

- **Areias da Quinta do Bacalhau (M_{QB})** - tratam-se de depósitos progradantes, relativamente espessos (cerca de 35 metros), de areias arcóscas fluviais, com bancadas de argilitos correspondentes a canais e a depósitos pelíticos de planície de inundação. A cor predominante é o amarelo. Os argilitos são cinzentos e contêm impressões de vegetais. Na região em estudo aflora entre Cacilhas e a Trafaria. No Cristo Rei existe jazida de vegetais fósseis (Pais, 1989; Antunes, *et al*, 1999 *in* Pais, *et al*, 2006). Equivalentes laterais foram reconhecidos em sondagem sendo constituídos principalmente por arenitos finos, micáceos, pouco fossilíferos e alguns bancos de biocalcarenitos de cor cinzento esverdeado;
- **Calcário do Casal Vistoso (M_{CV})** - são constituídos essencialmente, por uma bancada carbonatada, gessosa, às vezes grosseira, muito rica de moluscos e de algas rodófitas, com 3 a 12 metros de espessura. Na região em estudo constitui banda contínua entre Cacilhas e Trafaria. Foi reconhecido em sondagem sendo representado por biocalcarenitos verdes acinzentados, com alguns corais;
- **Areias com *Placuna Miocénica* (M_{Pm})** - são representadas por areias amarelas fluviais, com seixos rolados e argilas arenosas com vegetais e ostras sendo frequentes impregnações de pirolusite, que lhes conferem cor negra. Seguem-se areias, em parte eólicas, associadas a finos leitos de argila, podendo corresponder a dunas litorais e a ambientes deltaicos. Na área em estudo o conjunto está bem representado nas arribas do rio Tejo, entre Cacilhas e a Trafaria. Foi reconhecido em sondagem sendo representada por siltitos micáceos, passando a arenitos finos pouco fossilíferos cinzento esverdeados.

Langhiano

- **Calcário de Musgueira (M_{Mu})** - é representado por biocalcarenito branco, às vezes amarelado, arenoso, frequentemente grosseiro, muito rico de moluscos, com algas rodófitas. Na região em estudo constitui o topo das arribas da margem esquerda do tejo aflorando entre Cacilhas e a Trafaria. Em sondagem é constituído por biocalcarenitos e arenitos finos micáceos cinzento esverdeados.

Langhiano superior e Serravaliano

- **Areias de Vale de Chelas e Calcários de Quinta das Conchas indiferenciados (M_{VQ})** - Esta unidade apenas ocorre na área em estudo na região de Almada-Trafaria onde não é possível diferenciar as duas unidades que, no entanto encontram-se bem definidas na região de Lisboa. Afloram, na parte inferior, margas arenosas com níveis de arenitos fossilíferos passando a areias feldspáticas e a margas esbranquiçadas e castanhas para o topo e, na parte superior níveis argilo-margosos com intercalações de bancadas de biocalcarenitos alaranjados (Legoinha, 2001 *in* Pais, *et al*, 2006). Ocorre entre Cacilhas e a Trafaria prolongando-se pela arriba fóssil da Costa de Caparica até às proximidades da Costa de Caparica;

- **Argilas azuis de Xabregas (M_{xa})** - trata-se de conjunto silto-argiloso, às vezes com areias finas, de cor cinzento azulado, em regra são muito ricos de moluscos, de foraminíferos e de ostracodos. Na área em estudo constituem uma banda contínua entre a Margueira (Cacilhas), Pragal, Murfacém e Costa de Caparica onde estão particularmente bem expostas. Foram reconhecidas em sondagem onde são representadas por siltitos argilosos, micáceos cinzento esverdeados com algumas intercalações de biocalcarenitos;
- **Calcários de Marvila e Grés dos Grilos indiferenciados (M_{MG})** - Esta unidade apenas ocorre na área em estudo onde não é possível diferenciar as duas unidades que, no entanto se encontram bem definidas na região de Lisboa. Constituem banda estreita que se estende da Margueira, Pragal, Alto de Brielas e Costa de Caparica, sendo constituídos por arenitos finos e biocalcarenitos amarelados com numerosos fragmentos de equinídeos de que se destaca *Schizaster scillae*. Em sondagem os Grés dos Grilos e os Calcários de Marvila são constituídos, na parte inferior, por arenitos finos micáceos; para o topo estão representados por siltitos muito micáceos de cor cinzento esverdeado.

Serravaliano terminal e Tortonian inferior

- **Areolas de Cabo Ruivo e Areolas de Braço de Prata indiferenciados (M_{CB})** - Na região em estudo não é possível individualizar as Areolas de Braço de Prata e de Cabo Ruivo pelo que são consideradas em conjunto. O conjunto é representado por alternâncias de arenitos finos, areias finas e bancadas finas de calcários margosos e gresosos muito fossilíferos, com cerca de 20 m de espessura. Afloram entre a Mutela e Costa de Caparica, desaparecendo para Sul de Foz do Rego. Os melhores afloramentos ocorrem na Arriba Fóssil da Costa de Caparica, para Sul desta localidade. Para Sul de Capuchos, a unidade é sobreposta, pelas areias arcóicas de Santa Marta, atribuídas ao pliocénico. O conjunto foi identificado em sondagem onde ocorrem arenitos finos a muito finos, muito micáceos, cinzentos-escuros.

Formações do Pliocénico

- **Formação de Santa Marta (P_{SM})** - está largamente representada na região em estudo. Na base ocorrem conglomerados pouco espessos descontínuos, melhor expostos junto da Lagoa de Albufeira. Seguem-se areias finas a grosseiras, quase sempre arcóicas, frequentemente com estratificação entrecruzada e/ou estruturas convolutas, fluviais. A cor é variável desde o branco (areias de Coima) até ao vermelho e amarelo. Os fundos de canal estão atapetados por leitos de calhaus muito rolados, alguns de rochas ígneas. No seio das areias ocorrem blocos isolados de arenitos cretácicos e nódulos de sílex. Atingem cerca de 320 m de espessura em Pinhal Novo, mas na faixa litoral não ultrapassam os 50 m. Os níveis argilosos afloram, nomeadamente, no areeiro da Mesquita, junto à ribeira da Apostiça. Frequentemente contêm restos de vegetais. No areeiro da Mesquita são comuns cristais de gesso de grandes dimensões, restos de vegetais, e bancos de ostras, para além de outros moluscos, incluindo

Dreissena. Localmente, e em especial na zona central do sinclinal de Albufeira, existem diatomitos e lignitos. Reconhece-se a presença de ouro em grãos que chegam a exceder 350 µm e em concentrações que atingem 3,2 ppm, associado a minerais de terras-raras (Salgueiro, *et al*, 2000 *in* Pais, *et al*, 2006).

Formações do Plio-Plistocénico

- **Conglomerado de Belverde (Q_{Be})** - sobrepõem-se ao conjunto arenoso de Santa Marta, possuindo cerca de 5-10 m de espessura, com clastos sub-rolados esbranquiçados (até 15 cm) e matriz arenosa. Os clastos, às vezes com faces polidas pelo vento, são dominados pelos quartzitos, seguindo-se o quartzo e, raramente, o sílex, rochas ígneas alteradas, arenitos, Xistos do Ramalhão, para além de outras. Esta formação corresponde ao último episódio deposicional de um Pré-Tejo antes da instalação do canal de escoamento actual. É reconhecido em sondagem, sendo representada por conglomerados médios, mal calibrados com matriz arenosa abundante.

Formações do Holocénico (recentes)

- **Depósitos de cobertura (Aterros, Aluviões, Areias de praia, Areias de duna, Depósitos de vertente)** - Segundo Caria (2012) “Nas formações dunares (d) é de referir a existência de dois conjuntos distintos, o primeiro, em relação direta com a praia, situado na base da arriba fóssil e o segundo, situado no topo da mesma. As areias de praia (ap) representam uma faixa contínua no litoral do concelho. Os depósitos de vertente (v), de acordo com Pais (2006) estão quase sempre presentes no sopé da arriba fóssil da Costa de Caparica, sendo muitas vezes bastante espessos, resultantes da erosão e recuo da arriba. Os aluviões (a) estão presentes nas linhas de água existentes no concelho, bem como alguns aterros, depositados com a finalidade de entulhar as mesmas. Na zona dos Capuchos e nos terrenos da Faculdade de Ciências e Tecnologia e do Almada Fórum existem aterros (a) com alguma expressão cartográfica”.

2.1.4 Enquadramento Geomorfológico e Tectónico

A região em estudo insere-se na Bacia do Tejo que segundo Pais (2006) corresponde a uma depressão tectónica alongada na direcção noroeste-sudoeste, que sofreu subsidência principalmente no decurso do Miocénico, sendo interpretada como uma bacia de ante-país gerada na dependência de um regime compressivo que desencadeou inversão tectónica da Bacia Lusitânica, situada a oeste, em resultado da convergência do continente africano com o bloco ibérico.

Na região de Lisboa e das colinas de Trafaria – Almada identificam-se essencialmente duas direcções estruturais de deformação dúctil, nomeadamente, dobramentos de eixo aproximadamente este-oeste afectando todas as formações de idade ante-pliocénica, no sector oeste até ao meridiano de Campolide – Almada, e um monoclinal de direcção aproximadamente norte-sul, na área este de Lisboa (Pais, *et al*, 2006).

Um dos acidentes tectónicos mais importantes da região é a denominada “falha do Gargalo do Tejo” que afecta o troço terminal do rio Tejo. De carácter provável esta estrutura tem direcção este-oeste e constitui uma rampa de cavalgamento vergente para sul. As evidências superficiais da sua existência são escassas, no entanto a “aparente continuidade dos sedimentos miocénicos entre as duas margens do rio Tejo e a mudança de percurso no troço vestibular deste rio são os argumentos invocados para a sua presença.” (Caria, 2012).

A geomorfologia da região é condicionada pela presença da escarpa marginal do rio Tejo a Norte e pela arribas fósseis da Costa da Caparica que separa a região da plataforma costeira da restante região e se torna arribas costeira na região da Fonte da Telha. As altitudes no Concelho de Almada variam entre os 0 e os 124 metros (segundo o modelo digital de terreno do Anexo 4) sendo que os declives mais suaves se apresentam na região Sul o que irá condicionar a instalação da rede de drenagem superficial (assunto mais desenvolvido no subcapítulo 2.1.6).

2.1.5 Enquadramento Climático

O clima na região em estudo caracteriza-se por ser marcadamente de regime oceânico com Invernos tépidos e Verões quentes devido à proximidade com o oceano Atlântico (Ferreira, *et al*, 2005). O regime oceânico caracteriza-se por uma amplitude térmica anual fraca indicando uma regularização térmica ao longo do ano, indicativa da influência directa do oceano numa atmosfera húmida.

De acordo com os dados bibliográficos recolhidos no Atlas do Ambiente, da Agência Portuguesa do Ambiente, a temperatura média anual na região do Concelho de Almada situa-se entre 16,0 e 17,5 °C, a precipitação média anual situa-se entre 600 e 700 mm na zona norte do concelho e entre 500 e 600 mm na zona sul, para o período entre 1931 e 1960, a humidade relativa varia entre os 70% e os 80% e a insolação varia entre as 2900 e as 3000 horas/ano (figura 5). Caria (2012) refere que a precipitação acumulada anual para o intervalo temporal entre os anos hidrológicos 1981/1982 e 2010/2011 é 642,58 mm o que se enquadra no intervalo apresentado.

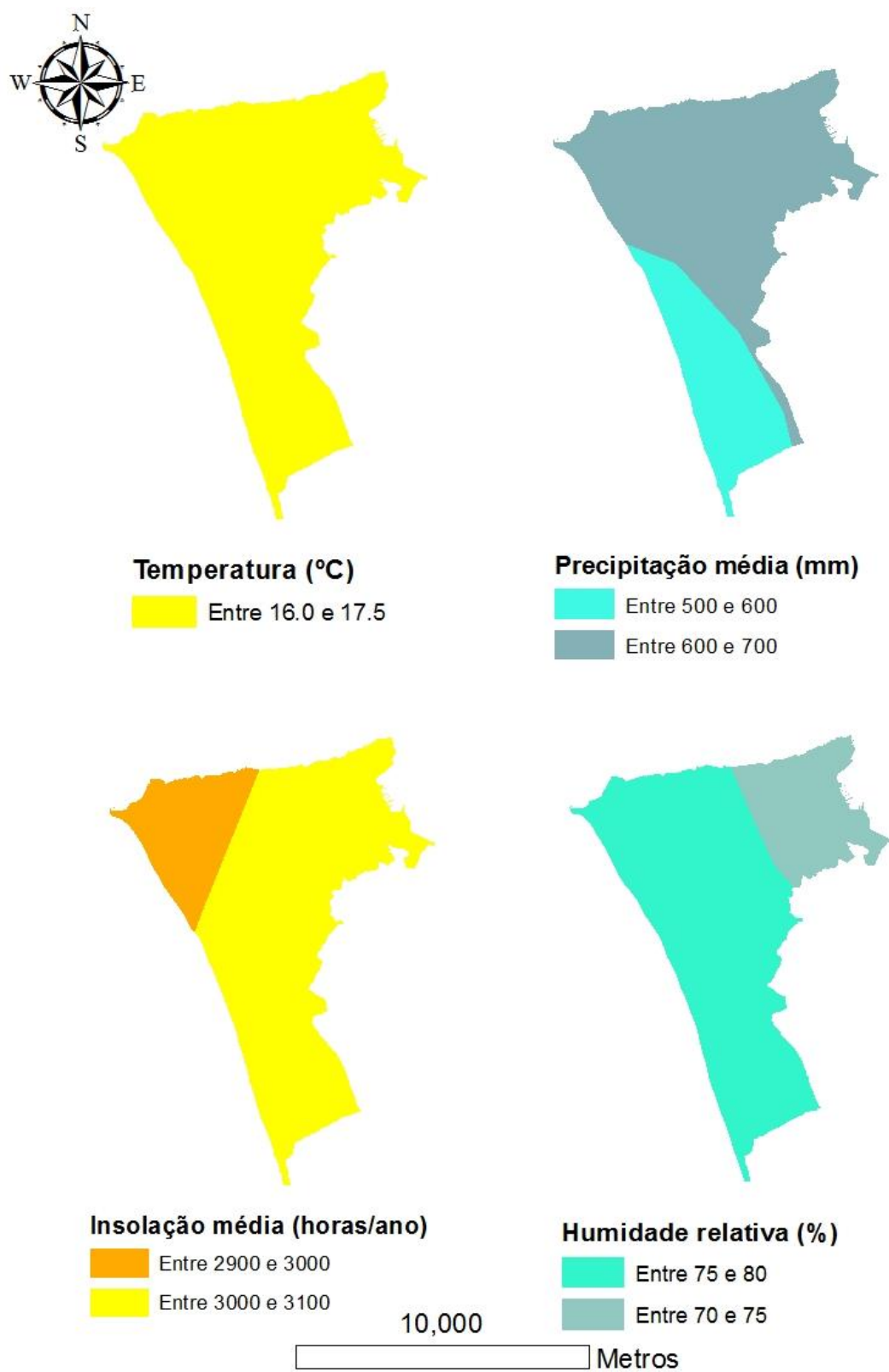


Figura 5 - Variáveis climatológicas para o Concelho de Almada (adaptado de: Atlas do Ambiente digital)

2.1.6 Enquadramento Hidrológico

No Concelho de Almada a drenagem superficial tem maior expressão na zona Norte devido ao maior declive dos terrenos. A drenagem esta essencialmente associada á escarpa marginal do Tejo onde é mas encaixada.

Na zona sul os vales deixam de ter expressão morfológica significativa pois os declives são mas suaves e os terrenos mais aplanados.

As linhas de água mais importantes do território de Almada são:

- A Norte - a Vala do Caramujo, a Vala do Guarda-Mor, a Vala da Regateira, a Vala da Caneira, a Vala da Sobreira e a Vala da Enxurrada;
- A Sul - a Ribeira da Foz do Rego e a Vala da Charneca.

As bacias hidrográficas mais importantes do Concelho de Almada apresentam-se na figura 6.

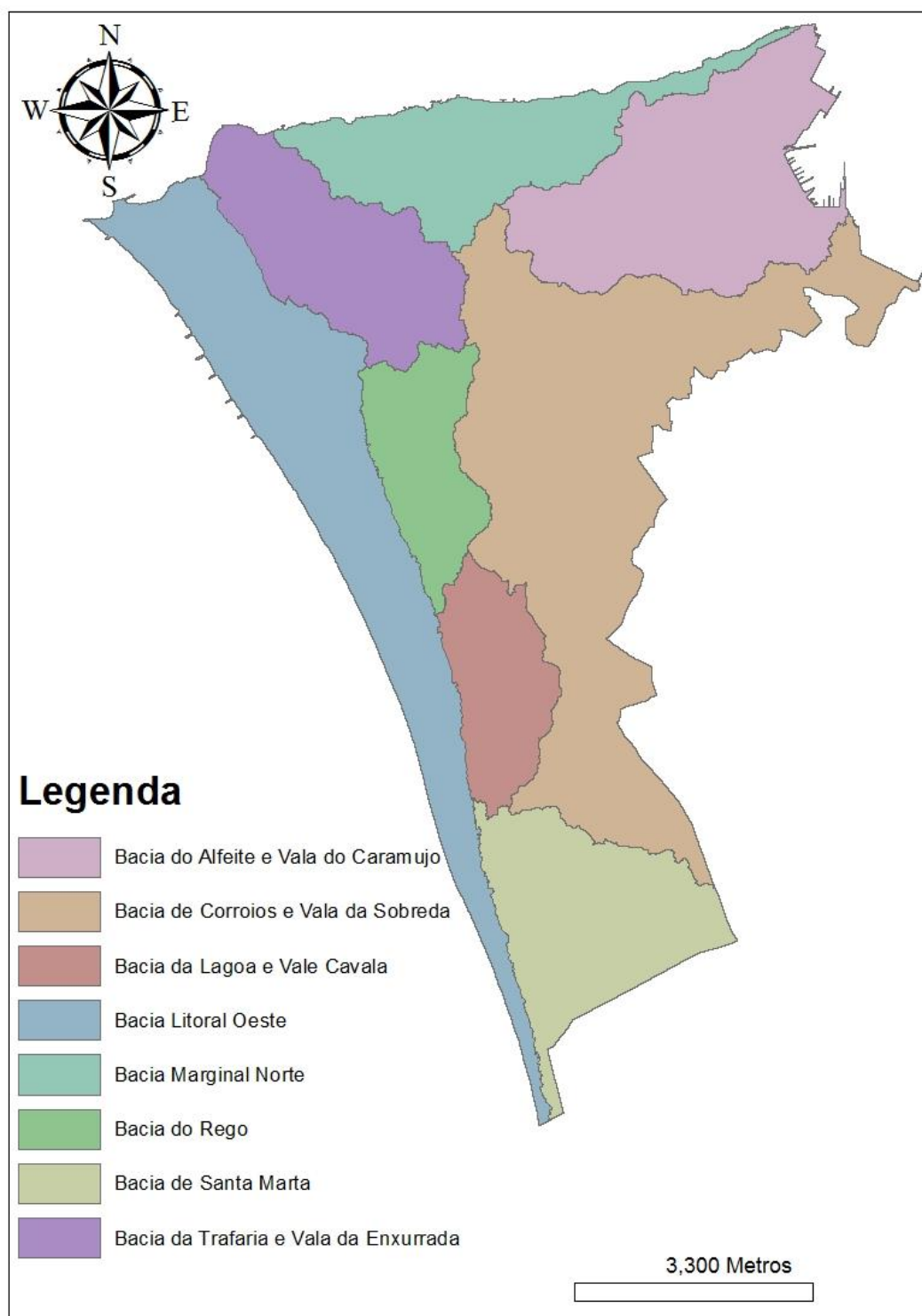


Figura 6 - Bacias hidrográficas do Concelho de Almada (fonte: Câmara Municipal de Almada)

A maioria destes cursos de água apresenta afluentes e estão associados a zonas aluvionares, como é o caso da Vala da Enxurrada, Vala da Caneira, Vala do Caramujo, Vala da Sobreda, Vala da Charneca e Ribeira da Foz do Rego.

Esta rede de drenagem está organizada em bacias hidrográficas que drenam para o Tejo (ao longo da escarpa marginal), para o estuário (entre Cacilhas e o Seixal), ou para o Oceano Atlântico (cortando a Arriba Fóssil da Costa de Caparica).

O caudal que se escoia superficialmente é alimentado, principalmente, por águas subterrâneas que intercetam as linhas de água, em quantidade variável ao longo do ano hidrológico. Pese embora alguns episódios de inundações esporádicas, sempre coincidentes com fortes precipitações, o fraco escoamento superficial registado indica a reduzida expressividade dos recursos hídricos superficiais no concelho.

2.1.7 Enquadramento Hidrogeológico

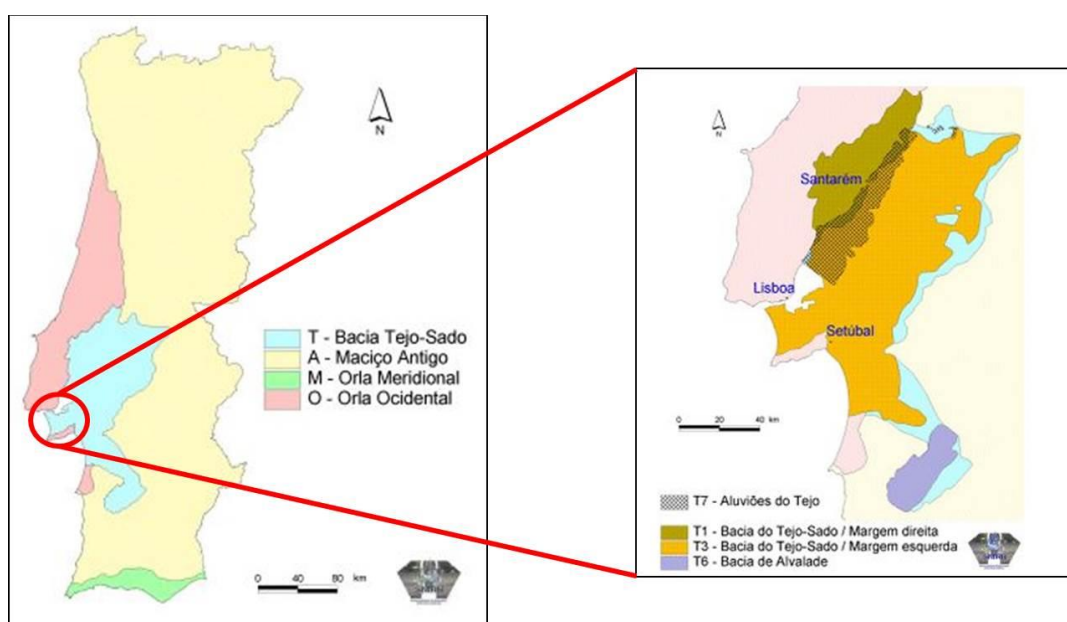


Figura 7 - Unidades hidrogeológicas de Portugal Continental (adaptado de: Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos)

O Concelho de Almada situa-se na unidade hidrogeológica da Bacia do Tejo-Sado e no sistema aquífero da Bacia do Tejo-Sado – Margem Esquerda (figura 7).

Este sistema aquífero tem uma extensão de 6875m km² abrangendo 26 Concelhos, tornando-o o maior sistema aquífero de Portugal (Almeida, C., *et al*, 2000a).

Na Península de Setúbal, o sistema é constituído por um aquífero superior livre, sobrejacente a um aquífero confinado, multicamada. Subjacente a este conjunto, separado por formações espessas de baixa permeabilidade (margosas), existe um aquífero confinado multicamada cujo suporte litológico são as formações gresocalcárias da base do miocénico. Pela natureza das formações presentes o sistema é essencialmente poroso (Almeida, C., *et al*, 2000a).

O aquífero superficial, na região em estudo, é constituído pelas formações pliocénicas cujas características estão referidas na tabela 5:

Tabela 5 - Sumário das características do aquífero superficial na região em estudo (fonte: Almeida, C., 2000).

Produtividade mediana	15,5 l/s
Transmissividade	Entre 100 e 3000 m ² /dia
Recarga	99 mm/ano para 77% da área do Concelho (Caria, 2012)
Fácies Hidroquímica	Cloretada sódica e cálcica, bicarbonatada calco-magnésiana
Zonas de descarga	Rio Tejo e Oceano Atlântico

Segundo Pais (2006) “O modelo conceptual simplificado considerava apenas um aquífero freático separado, por um aquífero, de um aquífero semi-confinado. Admitia-se que, ao contrário do aquífero superior no qual se considera o estuário do Tejo como a principal zona de descarga, o aquífero mais profundo prolonga-se sob o estuário do Tejo, havendo apenas alguma descarga para o estuário por drenância, através do aquífero, situando-se a principal descarga a Oeste, no oceano, por interface com a água salgada a alguns quilómetros da costa.”

A água captada nas formações pliocénicas apresenta valores de nitratos que estão acima dos valores máximos recomendáveis para consumo humano, definidos no Anexo VI do Decreto-Lei 236/1998 de 1 de Agosto, o que é explicável pela grande extensão de afloramento destas formações. O único parâmetro que excede os valores máximos admissíveis definidos no mesmo anexo é o ferro. Outros parâmetros excedem os valores recomendáveis como os cloretos, sódio, azoto amoniacal e sulfatos. Os cloretos excedem estes valores em 94% das análises efectuadas (Almeida 2000a) o que torna esta água de fraca qualidade para consumo humano.

Segundo Almeida (2000a) estas águas apresentam um baixo perigo de alcalinização do solo e um baixo a médio perigo de salinização do solo.

As características do aquífero constituído pelas formações miocénicas está apresentado na tabela 6.

Tabela 6 - Sumário das características do aquífero miocénico na região em estudo. (fonte: Almeida, C., et al, 2000).

Produtividade mediana	35 l/s
Transmissividade	Entre 127 e 693 m ² /dia
Coefficiente de Armazenamento	10 ⁻³
Fácies Hidroquímica	Bicarbonatada calco-magnésiana
Zonas de descarga	Rio Tejo e Oceano Atlântico

No entanto, segundo Almeida, (2000) uma grande parte das captações na península de Setúbal capta água das formações da base do pliocénico e miocénicas mais profundas.

Da análise desta água de mistura de fácies bicarbonatada cálcica, cloretada sódica ou cloretada cálcica verifica-se que apenas o ferro excede os valores máximos admissíveis, definidos no Anexo VI do Decreto-Lei 236/1998 de 1 de Agosto, no entanto apenas três parâmetros não excedem os valores máximos recomendáveis: o pH, o magnésio e o potássio, o que torna esta água de má qualidade para consumo humano.

Segundo Almeida, (2000) verificou-se ainda que, ao comparar a água de mistura das duas formações aquíferas com a água de cada uma delas isoladamente, o pliocénico parece ter uma influência maior na qualidade da água.

Quanto à qualidade da água para uso agrícola, estas águas apresentam um baixo perigo de alcalinização do solo e um baixo a médio perigo de salinização do solo, o que corresponde às mesmas características dos dois aquíferos quando considerados em separado.

3. Descrição dos parâmetros utilizados e sua influência na vulnerabilidade à contaminação de massa de água subterrânea

Neste capítulo pretende-se efectuar uma descrição sumária dos parâmetros utilizados no cálculo dos índices aplicados e referir a sua influência na vulnerabilidade. Este capítulo será baseado essencialmente nos trabalhos de Aller (Aller, L., 1987) sobre o índice DRASTIC, Ribeiro (Ribeiro, L., 2005) sobre o índice de susceptibilidade e também a Resolução de Conselho de Ministros 81/2012 que apresenta o índice de susceptibilidade adaptado à delimitação da REN.

3.1 Profundidade do nível da água

Este parâmetro irá corresponder à profundidade do topo do nível aquífero em estudo medido em captações de água subterrânea, com o auxílio de sonda de nível ou calculado através do conhecimento do nível hidrostático e da cota a que se encontra a captação (figura 8).

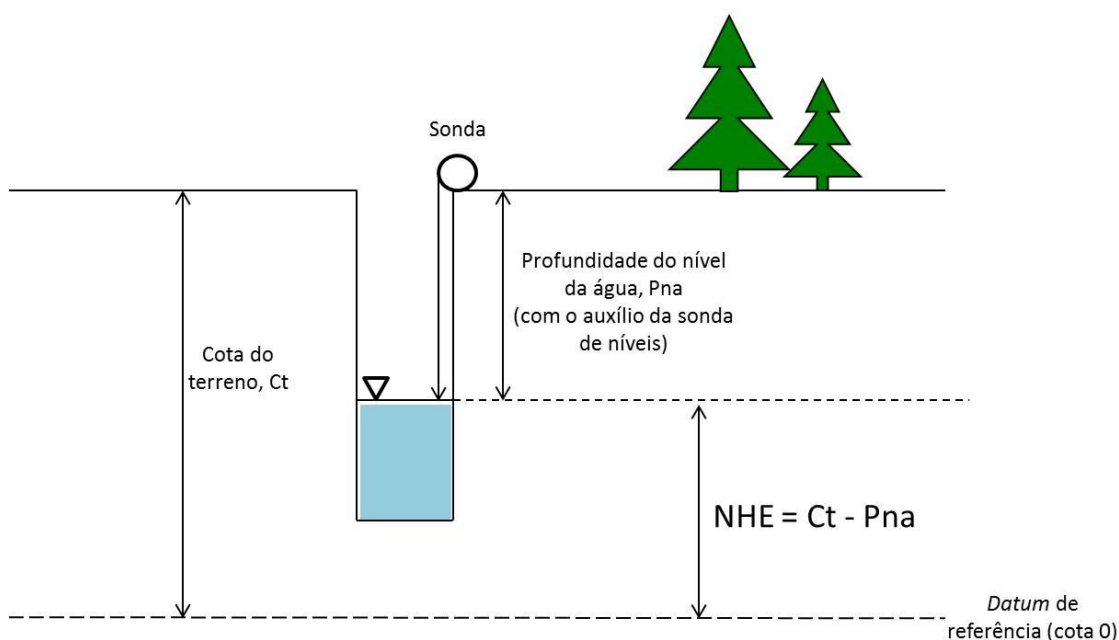


Figura 8 - Relação entre nível hidrostático (NHE) e profundidade do nível da água numa captação de água subterrânea

Este parâmetro influencia a distância que um contaminante tem que percorrer até atingir o aquífero podendo ajudar a determinar o tempo de contacto com o meio geológico não saturado que se encontra acima do nível aquífero. No geral, quando menor a profundidade do nível da água, menor a probabilidade de atenuação da contaminação pois existe um menor tempo de contacto com o meio geológico que pode promover essa atenuação.

Este parâmetro é utilizado em todos os índices estudados tendo a seguinte ponderação (tabelas 7 e 8).

Tabela 7 - Ponderação para o parâmetro profundidade do nível da água para os índices DRASTIC (Aller, L., *et al*, 1987) e IS (Ribeiro, L., 2005).

Profundidade da água (<i>Depth to water, D</i>)	
Profundidade (m)	Pontuação
< 1.5	10
1.5 – 4.6	9
4.6 – 9.1	7
9.1 – 15.2	5
15.2 – 22.9	3
22.9 – 30.5	2
> 30.5	1

Tabela 8 - Ponderação para o parâmetro profundidade do nível da água para o índice IS segundo a Resolução de Conselho de Ministros 81/2012.

Profundidade da água (<i>Depth to water, D</i>)	
Profundidade (m)	Pontuação
< 1.5	100
1.5 – 4.6	90
4.6 – 9.1	70
9.1 – 15.2	50
15.2 – 22.9	30
22.9 – 30.5	20
> 30.5	10

3.2 Recarga

A recarga (natural e/ou artificial) é o parâmetro que mede a quantidade de água que chega ao aquífero fazendo aumentar o volume de água armazenada e passível de extracção. A água de recarga constitui o meio através do qual um contaminante é transportado quer verticalmente até ao aquífero, quer horizontalmente através do mesmo.

Num aquífero livre a área de recarga corresponde normalmente à área do aquífero o que faz com que a recarga seja mais facilmente conseguida, não havendo níveis de baixa permeabilidade que retardem a chegada da água à zona saturada, fazendo com que neste tipo de aquíferos o potencial de contaminação das água subterrâneas seja maior.

A quantidade de água de recarga controla também os fenómenos de diluição e dispersão dos contaminantes, sendo por isso um dos parâmetros presentes em todos os índices considerados na presente dissertação, cuja ponderação se apresenta nas tabelas 9 e 10.

Tabela 9 - Ponderação para o parâmetro recarga para os índices DRASTIC (Aller, L., *et al*, 1987) e IS (Ribeiro, L., 2005).

Recarga do aquífero (<i>Net Recharge</i>, R)	
Recarga (mm/ano)	Pontuação
< 51	1
51 – 102	3
102 – 178	6
178 – 254	8
> 254	9

Tabela 10 - Ponderação para o parâmetro recarga água para o índice IS segundo a Resolução de Conselho de Ministros 81/2012.

Recarga do aquífero (<i>Net Recharge</i>, R)	
Recarga (mm/ano)	Pontuação
< 51	10
51 – 102	30
102 – 178	60
178 – 254	80
> 254	90

3.3 Geologia da formação aquífera

Este parâmetro refere-se ao material geológico, consolidado ou não consolidado, constituinte do aquífero e por onde a água pode circular através de poros (primários ou secundários) e/ou fracturas.

Este parâmetro condiciona a extensão do caminho que o contaminante pode percorrer, o que, junto com outros parâmetros como a condutividade hidráulica e o gradiente hidráulico condiciona o tempo disponível para os processos de atenuação tais como, fenómenos de sorção, reactividade e dispersão, controlando também a área efectiva de contacto entre o contaminante e o material geológico.

Assim sendo, quanto maior o tamanho do grão ou quanto maior o grau de fracturação, maior a porosidade, o que origina maior permeabilidade e uma menor capacidade de atenuação da contaminação, o que dá origem a um maior potencial de contaminação do nível aquífero.

Este parâmetro é utilizado em todos os índices estudados. As tabelas de ponderação são apresentadas abaixo (tabelas 11, e 12).

Tabela 11 - Ponderação para o parâmetro geologia da formação aquífera para os índices DRASTIC (Aller, L., *et al*, 1987) e IS (Ribeiro, L., 2005).

Material do aquífero (<i>Aquífer media</i>, A)		
Natureza do aquífero	Pontuação	Valor típico
Xisto argiloso, argilito	1 – 3	2
Rocha metamórfica/ígneia	2 – 5	3
Rocha metamórfica/ígneia alterada	3 – 5	4
“Till” glacial	4 – 6	5
Arenito, calcário e argilito estratificados	5 – 9	6
Arenito maciço	4 – 9	6
Calcário maciço	4 – 9	8
Areia e balastro	4 – 9	8
Basalto	2 – 10	9
Calcário carsificado	9 – 10	10

Tabela 12 - Ponderação para o parâmetro geologia da formação aquífera para o índice IS segundo a Resolução de Conselho de Ministros 81/2012.

Material do aquífero (<i>Aquífer media</i>, A)		
Natureza do aquífero	Pontuação	Valor típico
Xisto argiloso, argilito	10 – 30	20
Rocha metamórfica/ígneia	20 – 50	30
Rocha metamórfica/ígneia alterada	30 – 50	40
“Till” glacial	40 – 60	50
Arenito, calcário e argilito estratificados	50 – 90	60
Arenito maciço	40 – 90	60
Calcário maciço	40 – 90	80
Areia e balastro	40 – 90	80
Balastro	20 – 100	90

3.4 Tipo de solo

Neste parâmetro considera-se solo como a camada mais superficial da zona não saturada que é caracterizada pela presença de actividade biológica, sendo considerada a zona de alteração mais superficial.

Esta zona de alteração tem um papel importante pois condiciona a quantidade de água de recarga que se pode infiltrar e atingir a zona não saturada que se situa imediatamente abaixo afectando a capacidade de um contaminante se mover verticalmente até essa zona.

Adicionalmente, em zonas onde o solo tem espessura considerável os processo de atenuação como a filtração, a biodegradação, os fenómenos de sorção e a

volatilização podem ser importantes originando uma diminuição da carga contaminante que poderá atingir os níveis aquíferos.

O potencial de contaminação para as águas subterrâneas irá depender do tipo de argila presente no solo, da sua expansibilidade e do tamanho do grão do solo. Estas características influenciam certos fenómenos de atenuação da contaminação, em especial a adsorção. A adsorção corresponde ao fenómeno em que ocorre a adesão de moléculas de um fluído a uma superfície sólida; o grau de adsorção depende da temperatura, da pressão, da área da superfície do sólido e do tempo de contacto. Este fenómeno pode ter grande expressão na superfície de certo tipo de argilas que têm por isso capacidade de remover contaminantes da água incorporando-os na sua superfície, o que acontece devido á presença de cargas eléctricas na superfície destes minerais.

Este parâmetro só é utilizado no índice DRASTIC, pois é considerado redundante relativamente á geologia da formação aquífera. A ponderação é apresentada na tabela 13.

Tabela 13 - Ponderação para o parâmetro tipo de solo para o índice DRASTIC (Aller, L., et al, 1987).

Tipo de solo (<i>Soil Media, S</i>)	
Solo	Pontuação
Fino ou ausente	10
Balastro	10
Areia	9
Turfa	8
Argila agregada e/ou expansível	7
Franco arenoso	6
Franco	5
Franco siltoso	4
Franco argiloso	3
Lodo	2
Argila não agregada e não expansível	1

3.5 Topografia

Este parâmetro refere-se à inclinação dos terrenos (neste caso em percentagem) e à sua variação. É importante, pois condiciona a infiltração da água no solo.

Quanto maior a inclinação dos terrenos menor o tempo de permanência da água à superfície, aumentando a escorrência superficial e diminuindo a infiltração. Por isso um contaminante que entre em contacto com a água numa zona de declives acentuados tem maior probabilidade de escorrer superficialmente podendo não se infiltrar, o que pode fazer com que o contaminante nunca chegue à zona saturada.

Este parâmetro é utilizado em todos os índices estudados com a ponderação apresentada nas tabelas 14 e 15.

Tabela 14 - Ponderação para o parâmetro topografia para os índices DRASTIC (Aller, L., *et al*, 1987) e IS (Ribeiro, L., 2005).

Topografia, (<i>Topography</i>, T)	
Declive (%)	Pontuação
< 2	10
2 – 6	9
6 – 12	5
12 – 18	3
> 18	1

Tabela 15 - Ponderação para o parâmetro topografia para o índice IS segundo a Resolução de Conselho de Ministros 81/2012.

Topografia, (<i>Topography</i>, T)	
Declive (%)	Pontuação
< 2	100
2 – 6	90
6 – 12	50
12 – 18	30
> 18	10

3.6 Influência da zona não saturada (zona vadosa)

Para o índice de vulnerabilidade que considera o parâmetro influência da zona vadosa, esta corresponde à faixa de terreno não saturado entre a base do solo e a zona saturada (figura 9). Esta definição é válida para aquíferos livres, pois em aquíferos confinados ou semi-confinados este parâmetro engloba também a influência da zona saturada que se encontra acima do nível aquífero em estudo que corresponde à camada confinante (Aller, L., *et al*, 1987).

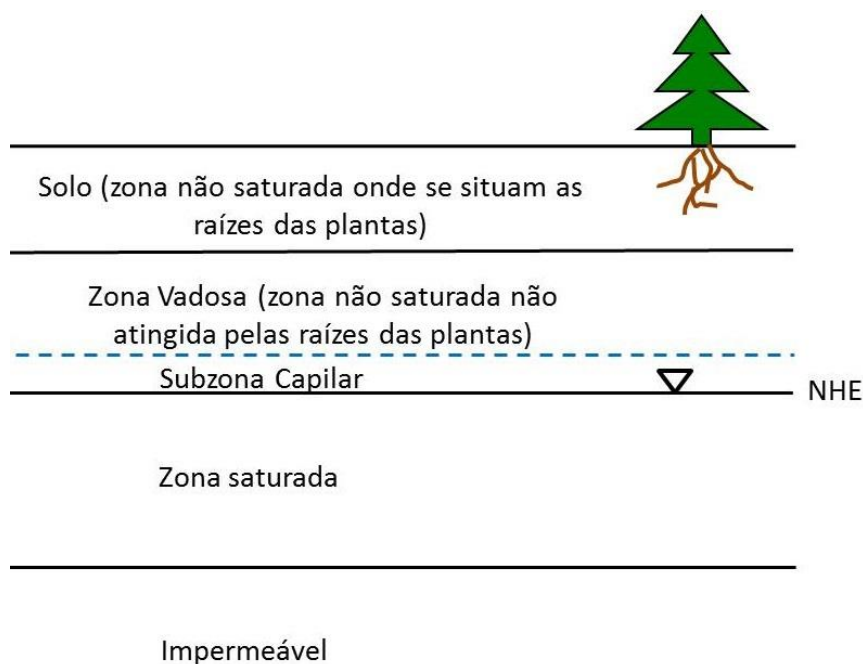


Figura 9 - Esquema simplificado de um perfil vertical do terreno onde exista um aquífero livre (adaptado de Aller, L., et al, 1987)

Na zona vadosa podem ocorrer os fenómenos de atenuação que ocorrem ao nível do solo (biodegradação e volatilização), embora com menor expressão, e os fenómenos de atenuação que ocorrem na zona saturada. A camada mais superficial da zona vadosa contribui ainda para a formação do solo por acção mecânica e/ou química o que contribui para o aumento da intensidade dos processos de atenuação referidos no subcapítulo 3.4.

Este parâmetro só é utilizado no índice DRASTIC pois é considerado redundante relativamente á geologia da formação aquífera. A ponderação é apresentada na tabela 16.

Tabela 16 - Ponderação para o parâmetro influência da zona não saturada (zona vadosa) para o índice DRASTIC (Aller, L., et al, 1987)

Impacto da zona não saturada (<i>Impact of the vadose zone, I</i>)		
Zona não saturada	Pontuação	Valor típico
Camada confinante	1	
Argila/Silte	2 – 6	3
Xisto argiloso, argilito	2 – 6	3
Calcário	2 – 5	3
Arenito	2 – 7	6
Arenito, calcário e argilito estratificados	4 – 8	6
Areia e balastro com percentagem significativa de silte e argila	4 – 8	6
Areia e balastro	4 – 8	8
Basalto	2 – 10	9
Calcário carsificado	8 – 10	10

3.7 Condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica corresponde à aptidão que o material geológico de um aquífero tem de transmitir água em toda a sua espessura saturada, que por sua vez controla o fluxo da água através de um dado gradiente hidráulico. O fluxo de água também controla a taxa a que um contaminante é transportado para longe do ponto de inserção no aquífero. A condutividade hidráulica é controlada pela porosidade e pela interconecção de espaços vazios no material que compõe o aquífero que pode ocorrer devido à porosidade primária, existência de fracturação e/ou existência de planos de estratificação.

A condutividade hidráulica corresponde ao coeficiente de proporcionalidade presente na lei de Darcy que indica que para o mesmo material geológico o caudal escoado é directamente proporcional à área da secção de escoamento e ao gradiente hidráulico (razão entre a diferença do nível de água entre dois pontos e a distância entre eles), podendo ser calculada através de fórmulas (como por exemplo a fórmula de Hazen), métodos de laboratório (permeâmetros) ou ensaios de campo (ensaios de caudal), existindo ainda tabelas que têm valores comuns para certas litologias.

A condutividade hidráulica só é utilizada no índice DRASTIC pois é considerada um parâmetro associado à geologia da formação aquífera tendo sido considerado redundante nos outros índices. A ponderação para este parâmetro encontra-se na tabela 17.

Tabela 17 - Ponderação para o parâmetro condutividade hidráulica para o índice DRASTIC (Aller, L., *et al*, 1987)

Condutividade hidráulica do aquífero (<i>Hydraulic Conductivity, C</i>)	
K (m/d)	Pontuação
0 – 4.1	1
4.1 – 12.2	2
12.2 -28.5	4
28.5 – 40.7	6
40.7- 81.5	8
> 81.5	10

3.8 Ocupação (uso) do solo

Este parâmetro refere-se à ocupação do solo à superfície seja ela natural ou antropogénica. A sua introdução no índice de susceptibilidade veio resolver uma das limitações do índice DRASTIC pois este índice não tinha em conta factores como a intensidade de aplicação e a persistência do contaminante.

No caso da contaminação por nitratos os aquíferos são por vezes mais sensíveis à carga contaminante do que aos outros parâmetros. A carga contaminante pode ser avaliada através do parâmetro ocupação do solo pois sabe-se à partida que certas

actividades como o uso de fertilizantes na prática agrícola são mais passíveis de introduzir nitratos na água que pode atingir os níveis aquíferos.

Por exemplo, e segundo Ribeiro (2005) “As práticas de irrigação têm um papel dominante na deterioração das águas subterrâneas, uma vez que induzem o processo de reciclagem e o aumento da mineralização das águas”.

O uso do solo influencia também a permeabilidade dos terrenos diminuindo a infiltração profunda ou semi-profunda. Um exemplo deste fenómeno é a impermeabilização dos terrenos devido à existência de parques de estacionamento ou zonas asfaltadas o que irá induzir um aumento da escorrência superficial e uma diminuição da infiltração e, por conseguinte da contaminação passível de atingir o nível aquífero.

Este parâmetro foi incluído no índice IS com a ponderação apresentada na tabela 18.

Tabela 18 - Ponderação para o parâmetro uso do solo para o índice IS (Ribeiro, L., 2005).

Uso do solo (<i>Land Use</i>, LU)	
Ocupação do solo	Pontuação
<u>Áreas agrícolas</u>	
Perímetros de rega (culturas anuais, ...)	90
Culturas permanentes (vinhas, pomares, oliveiras, ...)	70
Pastagens e áreas agro-florestais, áreas agrícolas heterogéneas	50
<u>Áreas artificiais</u>	
Descargas de resíduos industriais e aterros	100
Pedreiras, estaleiros, áreas mineiras a céu aberto	80
Áreas urbanas contínua, aeroportos, portos, vias férreas, áreas com actividades industriais e comerciais, ...	75
Áreas urbanas descontínuas	70
<u>Áreas naturais</u>	
Ambientes aquáticos (sapais, salinas, etc)	50
Florestas e zonas semi-naturais	0

4. Dados de base

Neste capítulo apresenta-se o tipo e origem dos dados considerados como base para os cálculos necessários para a determinação dos índices de vulnerabilidade que irão ser apresentados por parâmetro.

- **Profundidade do nível da água** - Dados compilados pela Câmara Municipal de Almada e pela Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa provenientes de diversas fontes.

- Pontos da Direcção Regional de Agricultura de Lisboa e Vale do Tejo (incluem dados de finalidade, profundidade, entre outros);
- Pontos da tese de doutoramento de Simões (1998);
- Pontos de água dos Serviços Municipalizados de Água e Saneamento da Câmara Municipal de Almada – identificação de pontos de água e tipologias;
- Furos de Captação dos Serviços Municipalizados de Água e Saneamento da Câmara Municipal de Almada – localização furos de captação, dados químicos, entre outros;
- Pontos da tese de mestrado de Ferreira (2012);
- Pontos utilizados para o trabalho de projecto de final de Licenciatura de Silva, M., (2011) (não publicado).

- **Recarga** - Tese de Mestrado de Caria (2012). Carta de solos cedida pela Câmara Municipal de Almada com a respectiva explicação da correcção;

- **Geologia da formação aquífera** - Carta Geológica em formato *shapefile* cedida pela Câmara Municipal de Almada;

- **Tipo de solo** - Carta de solos cedida pela Câmara Municipal de Almada.

- **Topografia** - Modelo Digital de terreno compilado a partir de dados da Câmara Municipal de Almada pelo Centro de Geologia da Faculdade de Ciências de Universidade de Lisboa através de dados cedidos pela Câmara Municipal de Almada;

- **Influência da zona não saturada** - Carta Geológica em formato *shapefile* cedida pela Câmara Municipal de Almada;

- **Condutividade hidráulica** - Dados compilados das seguintes fontes:

- Domenico & Schwartz (1998) - tabela com dados provenientes de várias zonas do globo para várias litologias;
- Ficha do sistema aquífero dos Aluviões do Tejo (Almeida 2000b) que foi utilizado por ter dados de uma região próxima para litologias semelhantes às presentes na área em estudo.

- **Ocupação do solo** - Delimitação do Uso do Solo cedida pela Câmara Municipal de Almada com explicação da metodologia adoptada. Nomenclatura *Corine Land Cover* (adaptado e traduzido de Caetano, M., *et al*, 2009).

5. Tratamento dos dados

5.1 Preparação dos dados de base

Os dados de base foram tratados consoante as suas especificidades. Irá fazer-se uma descrição sumária dos procedimentos adoptados para cada parâmetro antes do seu tratamento em SIG.

A profundidade do nível da água foi retirada das listagens do inventário de pontos de água efectuado. No entanto, a informação obtida, que provem de diversas fontes, não é completa, pelo que se tornou necessário seleccionar os pontos com informação relevante. No caso de apenas se conhecer o nível hidrostático é necessário efectuar os cálculos apresentados no subcapítulo 3.1. O mapa com a localização dos pontos recolhidos, bem como o mapa com a localização dos pontos recolhidos com informação relevante, encontram-se no Anexo 5.

A recarga, apresentada no trabalho de Caria (2012), necessitou de revisão, pois na carta de solos existiam zonas classificadas como áreas sociais que foram melhor caracterizadas. As áreas sociais correspondem a zonas urbanas impermeabilizadas mas também a zonas onde não foi possível realizar a amostragem necessária á classificação dos solos. No caso de Almada estas zonas correspondem essencialmente a áreas militares ou florestais e áreas privadas. Na revisão da carta de solos utilizada por Caria (2012) algumas dessas zonas foram amostradas e classificadas o que deu origem a uma carta de solos corrigida utilizada na presente dissertação.

O tipo de solo é uma das variáveis do programa BALSEQ_MOD (LNEC) um programa que permite efectuar o balanço hídrico sequencial diário a nível do solo, tendo por base uma série de pressupostos, utilizando dados de tipo e ocupação do solo e dados de precipitação. Os parâmetros utilizados neste programa são explicados em pormenor em Caria (2012).

A geologia da formação aquífera bem como a influência da zona vadosa foi obtida directamente através da carta geológica e da interpretação da respectiva notícia explicativa (Pais 2006). A pontuação usada nestes parâmetros varia entre o valor típico para cada classe litológica (constante nas tabelas 11 e 12 do subcapítulo 3.3) e um valor que foi considerado por se conhecer as características médias de porosidade, permeabilidade e variações na composição das litologias presentes na carta geológica que abrange a área em estudo.

O tipo de solo foi retirado directamente da carta de solos procedendo-se á interpretação da respectiva legenda que se encontra no anexo 4.

A topografia, que nos parâmetros dos índices em estudo é dada pela carta de declives em percentagem, foi obtida através do modelo digital do terreno. A carta de declives foi elaborada em SIG utilizando uma função específica (*slope*) que calcula a taxa de variação da elevação em cada célula de um ficheiro *raster*.

A condutividade hidráulica foi obtida através de tabelas (ver capítulo 4). Na tabela 19 pode ver-se os valores dados a cada uma das litologias presentes na zona.

Tabela 19 - Condutividade hidráulica das formações presentes na área em estudo (fonte: Domenico & Schwartz, 1998 e Almeida, 2000).

Formação	Condutividade hidráulica (m/dia)
Areias com " <i>Placuna miocenica</i> "	8,6486
Areias da Quinta do Bacalhau	8,6486
Areias de Santa Marta	21,6389
Areias do Vale de Chelas e Calcários de Quinta das Conchas	7,2994
Areolas da Estefânia	8,6486
Areolas de Braço de Prata e Areolas de Cabo Ruivo	8,6486
Argilas azuis de Xabregas	0,0002
Argilas azuis do Forno do Tijolo	0,0002
Calcário de Casal Vistoso	0,2592
Calcário de Musgueira	0,2592
Calcários de Entrecampos (Banco Real)	0,2592
Conglomerado de Belverde	784,0994
Grés de Grilos e Calcários de Marvila	8,6486
Aluviões	122,0000
Areias de duna	21,6389
Areias de praia	21,6389
Aterros	122,0000
Depósito de vertente	57,9226
Dunas	21,6389

Para o parâmetro ocupação (uso) do solo foi necessário efectuar uma correlação entre a nomenclatura utilizada na Carta de Ocupação do Solo de 2007 e a nomenclatura *Corine Land Cover* para permitir a atribuição da pontuação sugerida por Ribeiro (2005).

5.2 Tratamento dos dados em SIG

O tratamento de dados irá depender essencialmente do tipo de dados que se irá tratar. Assim sendo neste ponto é necessário distinguir entre dados de natureza vectorial e dados de natureza matricial.

5.2.1 Dados Vectoriais

Dados vectoriais são aqueles em e cada entidade geográfica é representada como ponto, linha ou polígono com localizações específicas e fronteiras, armazenando informação descritiva dessas mesmas entidades em tabelas de atributos nas quais cada linha corresponde a uma entidade específica.

Neste tipo de dados não é possível aplicar a álgebra de mapas que permite efectuar os cálculos necessários para a aplicação dos índices propostos. Assim sendo é necessário transformar todos os elementos que se encontram em formato vectorial para formato matricial para que se possa efectuar os cálculos.

5.2.2 Dados Matriciais

Dados matriciais (ou em formato *raster*) são dados representados através da divisão da área em estudo em iguais porções quadradas que se dão o nome de células (ou *pixéis*) as quais armazenam um determinado valor. Cada célula é identificada pela sua posição em função de um ponto de origem que coincide com o canto inferior esquerdo da malha criada. Apenas a localização do ponto de origem é armazenado pelo sistema, conjuntamente com o comprimento do lado das células e o número de células desde a origem (quer em linha quer em coluna).

A figura 10 mostra a representação das mesmas entidades geográficas nos dois formatos de dados. Da análise desta figura pode-se afirmar que os dados em formato matricial têm uma grade inexactidão posicional, no entanto são de edição mais fácil pois basta modificar os dados associados a cada célula e não a cada entidade geográfica no seu todo. Os dados no formato vectorial têm uma resolução mais elevada, no entanto não permitem uma análise simples nem a aplicação da álgebra de mapas que é necessária ao cálculo dos índices.

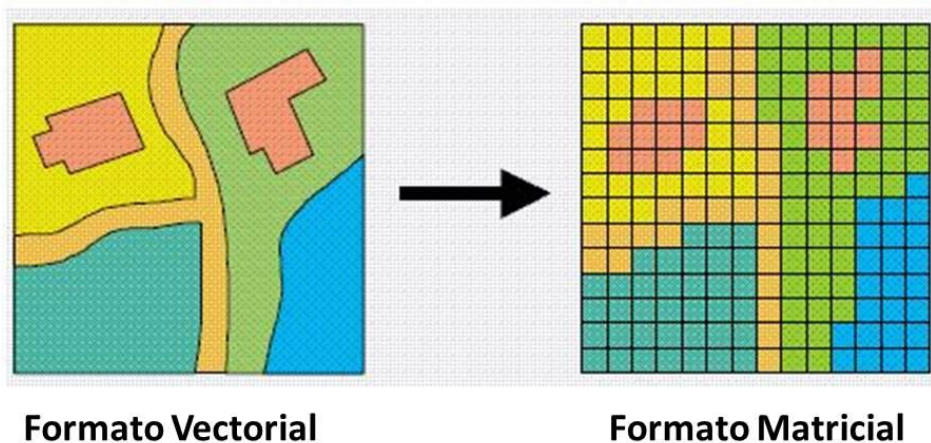


Figura 10 - Representação de dados geográficos nos diferentes formatos de dados (adaptado de *ArcGIS online help*).

O tratamento dos dados em SIG depende essencialmente do tipo de dados de entrada, sendo que para cada tipo de dados foi necessário utilizar processos diferentes:

- **Dados vectoriais do tipo ponto (pontos de água):** foi necessário efectuar interpolação espacial dos dados existentes para que a informação cobrisse toda a área em estudo. Neste caso os dados foram tratados usando a interpolação polinomial global que aproxima a superfície a interpolar a vários polinómios. Não foi utilizada a krigagem pois verificou-se a inexistência de correlação espacial entre os dados;
- **Dados vectoriais do tipo polígono (restantes parâmetros excepto a topografia):** neste tipo de dados pode proceder-se directamente à passagem para *raster*. No entanto foi necessário editar alguns ficheiros pois as tabelas de atributos não eram concordantes com as informações necessárias à aplicação dos índices;
- **Dados vectoriais do tipo linha:** não existem dados deste tipo para a elaboração desta dissertação logo não foram abordados os métodos para tratamento de dados deste tipo;
- **Dados matriciais (topografia):** utilizou-se a função adequado a para obter os declives em percentagem (*slope*) e procedeu-se à reclassificação.

Depois dos dados tratados foi necessário convertê-los para formato matricial e reclassifica-los consoante as tabelas dos parâmetros dos índices. A reclassificação é um processo usado em ficheiros em formato matricial, ficheiros estes nos quais cada célula contém um atributo que é alterado consoante uma tabela de reclassificação fornecida pelo usuário (figura 11). As tabelas utilizadas apresentam-se no capítulo 3.



Figura 11 - A função de reclassificação (adaptado de *ArcGIS online help*).

Após a reclassificação de todos os parâmetros foi aplicada a fórmula de cálculo para cada um dos índices, cálculos que são efectuados célula a célula. Para isso é necessário que as células correspondentes tenham o mesmo sistema de coordenadas.

Caso isso não aconteça é necessário proceder a transformações de coordenadas. As transformações de coordenadas utilizadas no presente trabalho foram baseadas em equações pré-definidas de sete parâmetros que permitem não só a translação dos pontos mas também a sua rotação (figura 12). Isso permite que todas as células coincidentes dos diversos ficheiros *raster* que contém a informação necessária aos cálculos se encontrem na mesma posição geográfica o que permite efectuar os cálculos.

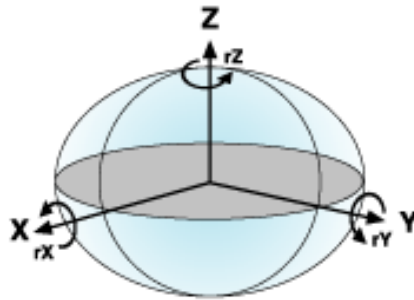


Figura 12 - Transformação de coordenadas de sete parâmetros. (fonte: *ArcGIS online help*).

6. Resultados

Neste capítulo apresentar-se-á os resultados obtidos para os diversos parâmetros bem como os resultados finais dos índices de vulnerabilidade estudados.

Os mapas respeitantes à reclassificação dos diversos parâmetros são apresentados em anexo (anexos 6 a 12)

Os resultados finais dos índices calculados são apresentados nas figuras 13, 14 e 15.

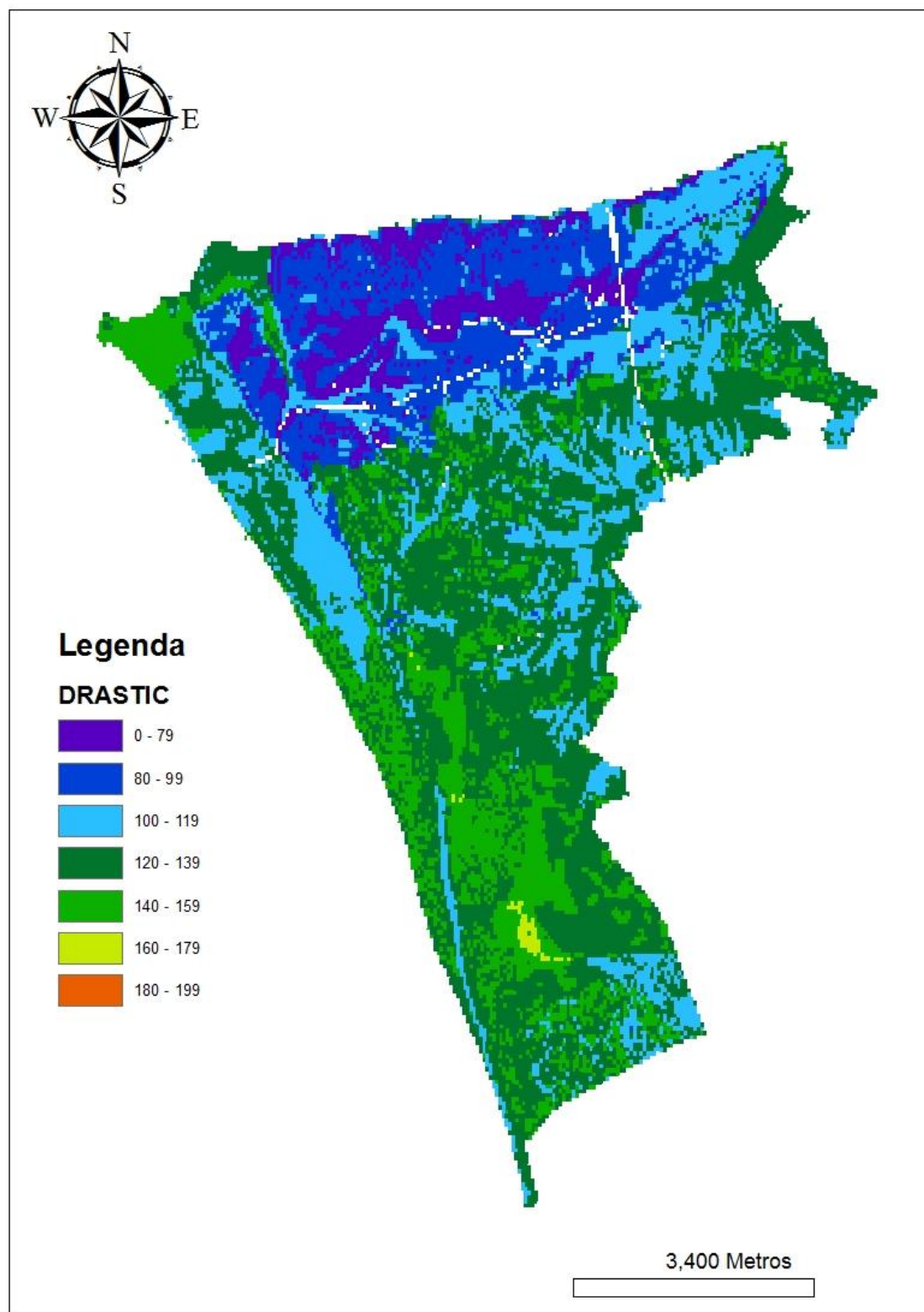


Figura 13 - Resultados obtidos com o índice DRASTIC (Aller, L., 1987).

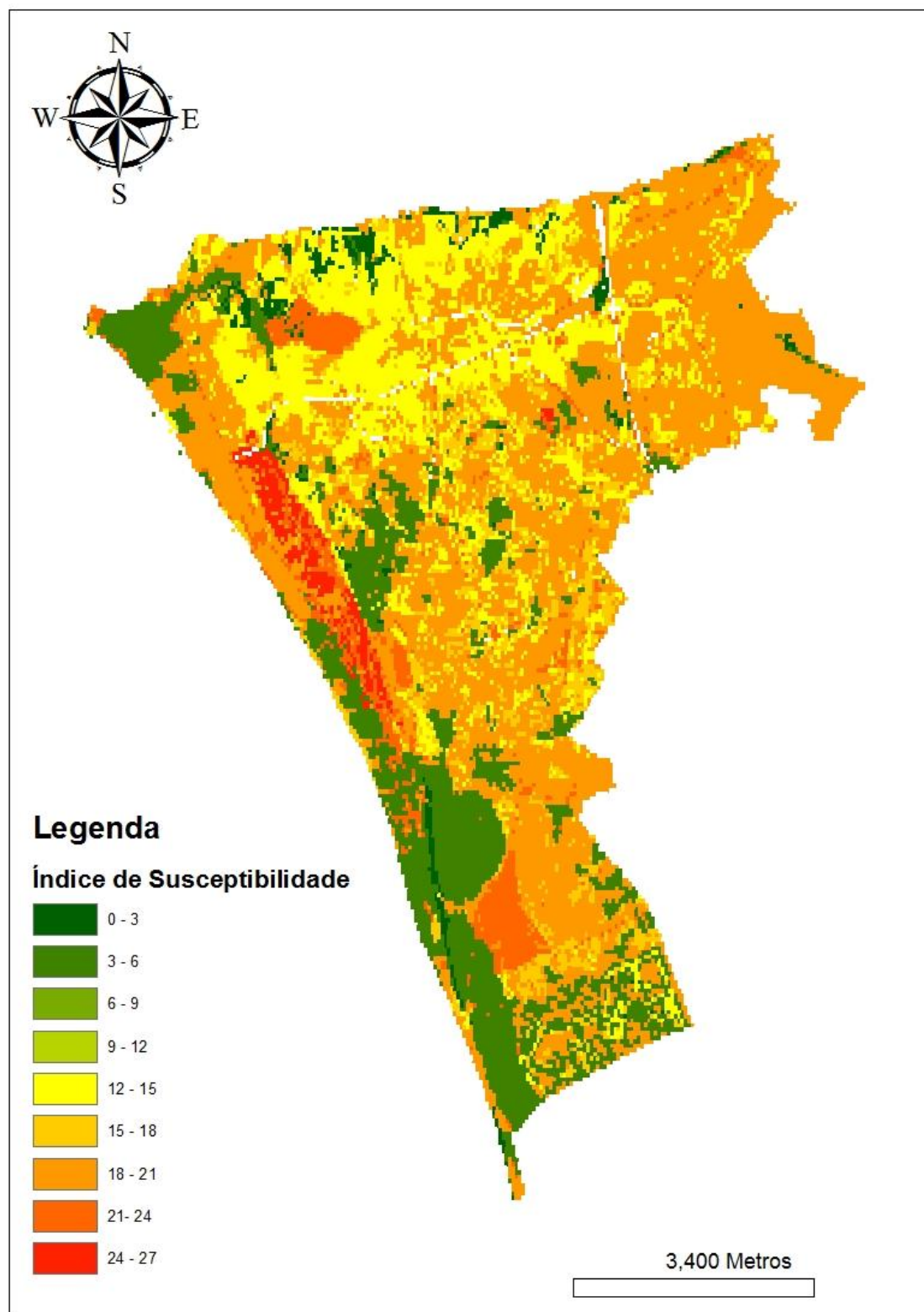


Figura 14 - Resultados obtidos com o índice de susceptibilidade (Ribeiro, L., 2005).

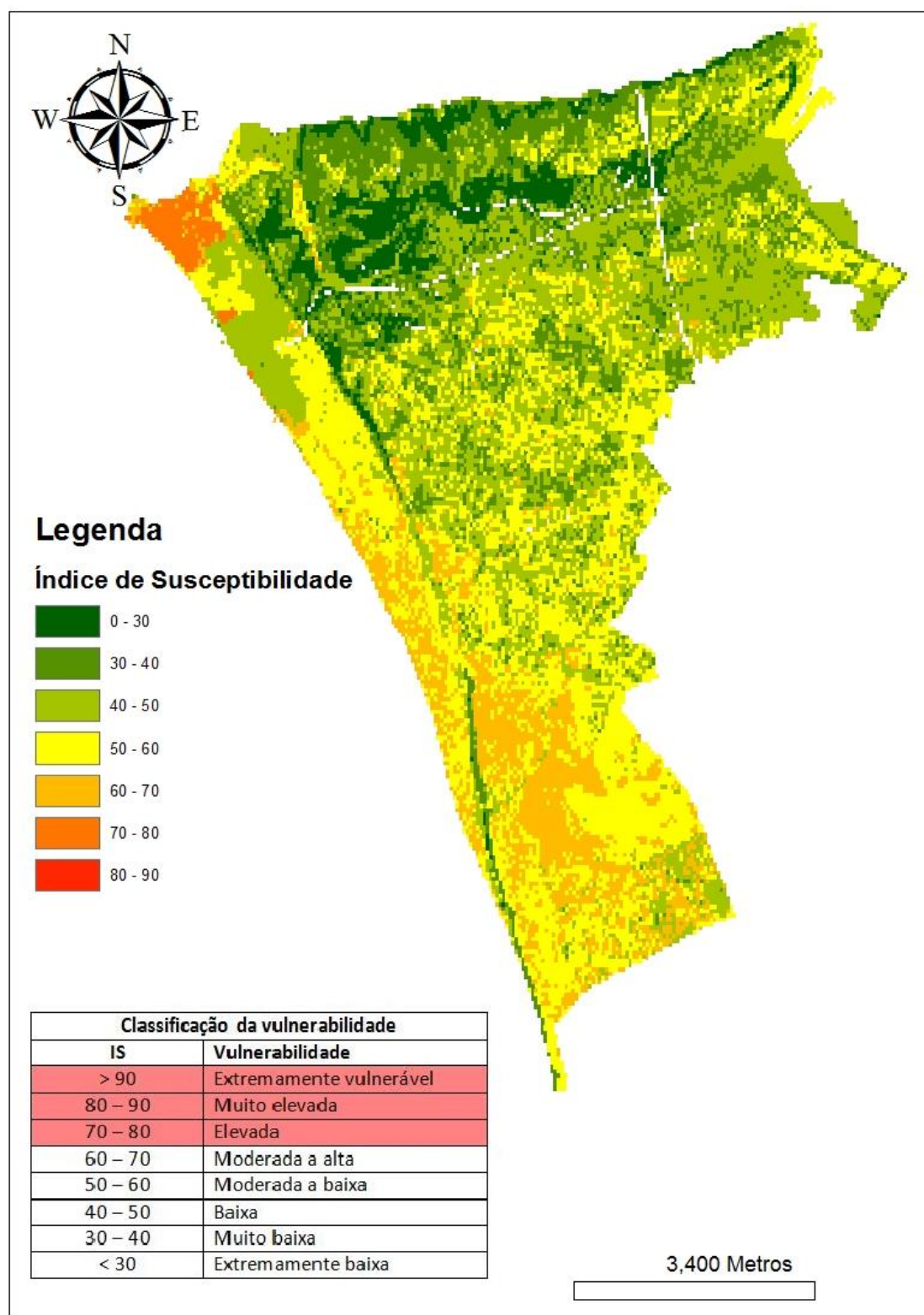


Figura 15 - Resultados obtidos com o índice de susceptibilidade calculado segundo a Resolução de Conselho de Ministros 81/2012.

7. Discussão dos resultados

Os resultados obtidos com o índice DRASTIC (Aller, L., *et al*, 1987) permitem afirmar que os valores mais elevados de vulnerabilidade à contaminação de águas subterrâneas no Concelho de Almada estão associados às zonas de declive menos acentuado (figura 13). Os valores da vulnerabilidade diferem da zona sul para a zona norte, apresentando valores menos acentuados a norte. Uma explicação plausível para esta observação pode estar relacionada com as litologias aflorantes nestas duas zonas, pois observa-se que o limite entre a zona de vulnerabilidade mais elevada e a zona de vulnerabilidade mais baixa parece coincidir grosseiramente com os limites entre as formações do miocénico, a norte, e as formações do pliocénico e plio-pleistocénico, a sul.

Os resultados obtidos com o índice de susceptibilidade (Ribeiro, L., 2005) (figura 14) permitem observar que existem valores elevados de vulnerabilidade numa faixa junto ao litoral na freguesia da Costa da Caparica, associada à presença de uma elevada taxa de ocupação do solo e impermeabilização. Observa-se também que os valores mais baixos de vulnerabilidade estão associados a ocupação natural do solo, zonas de duna, praia e floresta natural.

Os resultados obtidos com o índice de susceptibilidade segundo a Resolução de Conselho de Ministros 81/2012 são apresentados na figura 15. Da sua análise pode-se afirmar que não se encontram áreas extremamente vulneráveis no concelho, sendo que a zona a integrar em REN, cuja vulnerabilidade é superior a 70, se situa na zona noroeste do Concelho, na zona da Trafaria.

Da comparação entre os três índices utilizados pode-se concluir que, por norma, os valores mais baixos de vulnerabilidade se encontram na zona nordeste do concelho, associados a zonas com maior elevação. Tal não se verifica no índice de susceptibilidade calculado pelo método de Ribeiro (2005) o que parece indicar a grande influência do parâmetro uso do solo na vulnerabilidade.

Existem vários factores que afectaram a precisão dos resultados obtidos:

- Os valores de profundidade do nível da água são sensíveis a variações sazonais e anuais da precipitação atmosférica, que podem ser significativas. Num ano hidrológico normal a recarga directa pela precipitação é mais significativa nos meses de Outono e Inverno, facto que faz diminuir a profundidade do nível da água, enquanto que, em meses mais secos (Primavera e Verão) a mesma profundidade aumenta. Uma parte significativa dos pontos de água inventariados não dispunha de dados relativos à data de recolha dos mesmos o que faz aumentar a incerteza em relação ao valor da profundidade do nível da água, utilizado para a construção do parâmetro em causa. Para a resolução deste problema seria necessário uma nova série de dados

com as informações em falta, cujos pontos tivessem sido amostrados na mesma época;

- Para a definição da REN apenas se tem em conta o aquífero superficial. Na região em estudo existem outros aquíferos em profundidade, pelo que seria necessário conhecer a profundidade dos ralos e a profundidade total das captações para se ter conhecimento se efectivamente os pontos de água utilizados estão a captar o aquífero em estudo. Esta informação não se encontra disponível para grande parte dos pontos de água inventariados.
- A recarga não se encontra calculada para toda a área em estudo visto que ainda existem solos que se encontram classificados como área social, especialmente nas zonas militares existentes a nordeste do concelho. Para se conseguir calcular os índices, utilizando a recarga incompleta, considerou-se que as zonas onde a recarga não está calculada se englobam na classe de pontuação mais baixa. Assim sendo, introduziu-se um erro no cálculo da vulnerabilidade que é calculado e apresentado na tabela 20, erro esse que é mais elevado no índice DRASTIC (Aller, L., *et al*, 1987).

Tabela 20 - Erro associado às zonas sem recarga calculada.

Índice	Pontuação (classe mais baixa do parâmetro - tabelas 9 e 10)	Ponderação da recarga no cálculo final	Erro
DRASTIC (Aller, L., <i>et al</i>, 1987)	1	4	4
IS (Ribeiro, L., 2005)	1	0,212	0,212
IS (Resolução de Conselho de Ministros 81/2012)	10	0,27	2,7

Ao comparar a facilidade de aplicação dos índices propostos pode-se observar que o índice DRASTIC (Aller, L., *et al*, 1987) é o de mais difícil aplicação, pois possui parâmetros que só são possíveis de analisar indirectamente, como é o caso da influência da zona vadosa, a qual foi calculada pela interpretação da carta geológica. Para o parâmetro condutividade hidráulica foram utilizados valores tabelados (Domenico & Schwatz, 1998 e Almeida 2000b) pois para o seu cálculo seria necessário recorrer a trabalhos de campo para a realização de ensaios de caudal, o que não foi possível concretizar no âmbito da presente dissertação.

Pela análise do índice de vulnerabilidade usado para a definição da REN pode concluir-se que as áreas a incluir na REN, para efeitos de áreas de protecção e recarga de aquíferos, localizar-se-iam essencialmente junto à linha de costa e na parte noroeste do concelho. Esta análise não tem em conta as condicionantes de ordem antrópica já existentes pois, segundo a Portaria 419/2912 de 20 de Dezembro, existem

usos e acções considerados compatíveis com os objectivos de protecção ecológica e ambiental e de prevenção e redução de riscos naturais de áreas integradas na REN. Esta situação faz com que certas zonas definidas como “áreas estratégicas de protecção e recarga de aquíferos” possam ser utilizadas para certos fins que, ao não serem monitorizados adequadamente, possam aumentar a contaminação das massas de água subterrânea.

8. Conclusões

Os métodos seleccionados para o cálculo da vulnerabilidade são bastante sensíveis á qualidade dos dados de base usados para o seu cálculo. As principais diferenças entre os métodos são a os parâmetros utilizados e a sua ponderação. No índice de susceptibilidade calculado pelo método de Ribeiro (2005) a introdução do parâmetro uso do solo faz com que a vulnerabilidade tenha em conta as acções antrópicas efectuadas sobre o meio natural, o que dá origem a resultados diferentes.

A tabela 21 sumariza as principais diferenças entre os índices estudados:

Tabela 21 - Tabela sumário das diferenças entre índices.

	DRASTIC (Aller, L. <i>et al</i>, 1987)	IS (Ribeiro, L., 2005)	IS (Resolução do Conselho de Ministros 81/2012)
Tipo de índice	Intrínseco	Específico	Intrínseco
Parâmetros utilizados	D, R, A, S, T, I, C (7 parâmetros)	D, R, A, T, LU (5 parâmetros)	D, R, A, T (4 parâmetros)
Ponderação em cada parâmetro	1 a 10	1 a 10 (igual ao DRASTIC nos parâmetros coincidentes)	10 a 100
Ponderação para o cálculo final	$DRASTIC = D*5 + R*4 + A*3 + S*2 + T*1 + I*5 + C*3$	$IS = D*0.186 + R*0.212 + A*0.259 + T*0.121 + LU*0.222$	$IS = D*0.24 + R*0.27 + A*0.33 + T*0.16$

No caso de Almada, os três índices estudados não dão origem a resultados semelhantes. Para o índice DRASTIC (Aller, L. *et al*, 1987) parece haver uma maior influência da litologia, possivelmente por haver quatro parâmetros directa ou indirectamente relacionados com ela (geologia da formação aquífera, tipo de solo, influência da zona vadosa e condutividade hidráulica).

Ao retirar-se os parâmetros redundantes, como acontece no índice de susceptibilidade (Ribeiro, L., 2005), e introduzir-se o parâmetro uso do solo verifica-se que a vulnerabilidade elevada está associada a espaços edificados ou com ocupação antrópica.

Analisando os três índices separadamente conclui-se:

- Índice DRASTIC (Aller, L., *et al*, 1987) - permite afirmar que os valores mais elevados de vulnerabilidade à contaminação de águas subterrâneas no Concelho de Almada estão associados ás zonas de declive menos acentuado. Os valores da vulnerabilidade diferem da zona sul para a zona norte, apresentando valores menos acentuados a norte.

- Índice de susceptibilidade (Ribeiro, L., 2005) - permite observar que existem valores elevados de vulnerabilidade numa faixa junto ao litoral na freguesia da Costa da Caparica, associada à presença de uma elevada taxa de ocupação do solo e impermeabilização. Observa-se também que os valores mais baixos de vulnerabilidade estão associados a ocupação natural do solo, zonas de duna, praia e floresta natural.
- Índice de susceptibilidade (Resolução de Conselho de Ministros 81/2012) - pode afirmar-se que não se encontram áreas extremamente vulneráveis no concelho, sendo que a zona a integrar em REN, cuja vulnerabilidade é superior a 70, se situa na zona noroeste do Concelho, na zona da Trafaria.

Da comparação entre os três índices utilizados conclui-se que, por norma, os valores mais baixos de vulnerabilidade se encontram na zona nordeste do concelho, associados a zonas com maior elevação. Tal não se verifica no índice de susceptibilidade calculado pelo método de Ribeiro (2005) o que parece indicar a grande influência do parâmetro uso do solo na vulnerabilidade.

9. Trabalhos futuros

No âmbito da definição da REN no Concelho de Almada seria importante o conhecimento actual da piezometria no concelho através de medições no terreno mais actuais com a indicação do mês da sua recolha para que seja possível elaborar um mapa piezométrico actual da região.

Seria importante também que a recarga fosse conhecida para toda a área do concelho seja através do conhecimento do tipo de solo nas áreas em falta ou por outros métodos.

Um dos objectivos iniciais desta tese seria a construção de um modelo que englobasse todas as ferramentas a utilizar para o tratamento dos dados e que pudesse ser utilizado para a definição da REN em qualquer região do país. Este modelo permitiria otimizar a definição da REN para a tipologia considerada permitindo acelerar o processo. Para tal seria necessário efectuar uma uniformização dos dados de base ao nível do seu tipo e formato pois tal varia muito de município para município.

Bibliografia

- Aller, L.; Bennet, T.; Lehr, J.H. Petty, R. J. (1987), *"DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydro-geologic settings"*, U.S. EPA Report 600/2-85/018 20 pp.;
- Almeida, C; Mendonça, J.J.L.; Jesus, M.R.; Gomes, A.J. (2000a), *"Sistemas Aquíferos de Portugal Continental - Ficha T3"*, Centro de Geologia e Instituto da Água, 27 pp.;
- Almeida, C; Mendonça, J.J.L.; Jesus, M.R.; Gomes, A.J. (2000b), *"Sistemas Aquíferos de Portugal Continental - Ficha T7"*, Centro de Geologia e Instituto da Água, 14 pp.;
- Caetano, M.; Nunes, V.; Nunes, A. (2009), *"CORINE Land Cover 2006 for Continental Portugal"*, Relatório técnico, Instituto Geográfico Português;
- Caetano, M.; Araújo, A.; Nunes, A.; Nunes, V.; Pereira, M. (2009), *"Accuracy assessment of the CORINE Land Cover 2006 map of Continental Portugal"*, Relatório técnico, Instituto Geográfico Português;
- Caria, C. (2012), *"Estudo da recarga de águas subterrâneas do Concelho de Almada"*, Dissertação apresentada à Universidade de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em Geologia Aplicada, na especialidade de Hidrogeologia, 124 pp.;
- Decreto-Lei 58/2005 de 29 de Dezembro - Diário da República, 1.ª série-A - N.º 249 - 29 de Dezembro de 2005;
- Domenico, P.A.; Schwartz, F.W. (1998), *"Physical and Chemical Hydro-geology"*, 2ª edição, John Wiley & Sons, Inc., 506 pp.;
- Ferreira, A.B.; Ferreira, D.B.; Medeiros, C.A.; Moreira, M.E.; Neto, C.S.; Ramos, C. (2005), *"Geografia de Portugal - Volume 1 - O Ambiente físico"*, 1ª edição, Círculo de Leitores, 405 pp.;
- Ferreira, F. (2012), *"Avaliação dos Impactes das Alterações Climáticas nos Aquíferos Costeiros do Concelho de Almada"*, Dissertação apresentada à Universidade de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em Geologia Aplicada, na especialidade de Hidrogeologia, 100 pp.;
- Oliveira, M.M. (2006), *"Recarga de Águas Subterrâneas: Métodos de Avaliação"*. Teses e Programas de Investigação, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa. 440 pp.;
- Pais, J.; Moniz, C.; Cabral, J.; Cardoso, J.L.; Legoinha, P.; Machado, S.; Morais, M.A.; Lourenço, C.; Ribeiro, M.L.; Henriques, P.; Falé, P. (2006),

“Carta Geológica de Portugal na Escala 1:50.000. Notícia Explicativa da Folha 34-D” (Lisboa). Serviços Geológicos Portugal, Lisboa, 73 pp.;

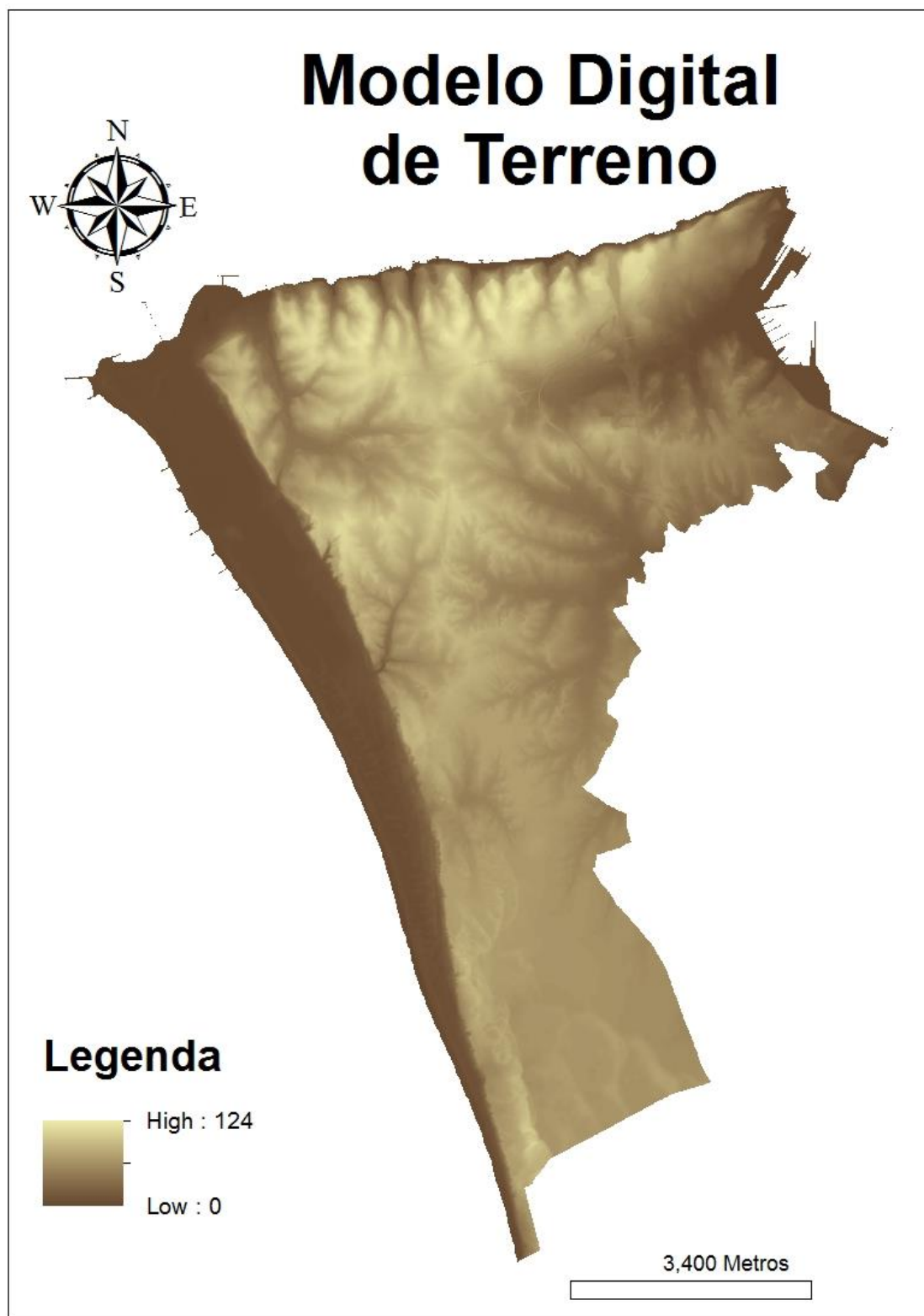
- Portaria 419/2912 de 20 de Dezembro - Diário da República, 1.ª série - N.º 246 - 20 de Dezembro de 2012;
- Resolução do Conselho de Ministros n.º 81/2012 - Diário da República, 1.ª série - N.º 192 - 3 de outubro de 2012 26 pp.;
- Ribeiro, L. (2005), “Um novo índice de vulnerabilidade específico de aquíferos à contaminação: Formulação e Aplicações”, in Atas do 7.º SILUSBA, APRH, Évora, 15 pp.;
- Serrano, S.E. (1997), “*Hydrology for Engineers, Geologists and Environmental Professionals An Integrated Treatment of Surface, Subsurface, and Contaminant Hydrology*”, HydroScience Inc., 452 pp.;
- Silva, A.M.; Rodrigues, C.; Fernandes, M.; Simões, S. (2011), “Estudo hidrogeológico do Concelho de Almada”, Trabalho final da cadeira de projecto da Licenciatura em Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, não publicado;
- Simões, M.M. (1998), “Contribuição para o conhecimento hidrogeológico do Cenozoico na Bacia do Baixo Tejo”. Dissertação apresentada à Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de Doutor em Geologia, na especialidade de Hidrogeologia, Vol. I, 270 pp..

Endereços da Internet consultados:

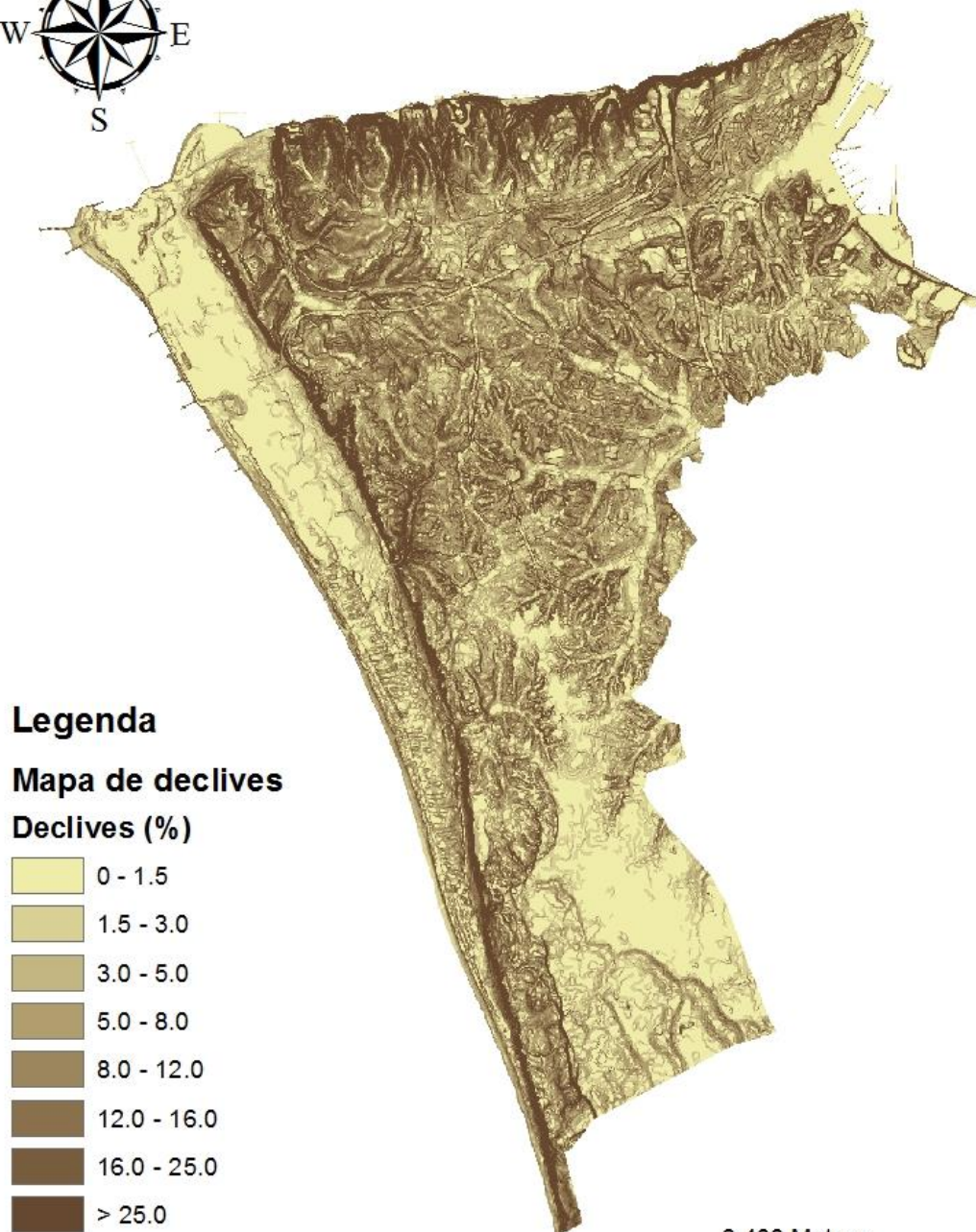
- <http://www.snirh.pt/>
- <http://resources.arcgis.com/en/help/>
- <http://www.apambiente.pt/dqa/index.html>
- <http://www.m-almada.pt/xportal/xmain?xpid=cmav2>
- <http://sniamb.apambiente.pt/webatlas/index.html>
- http://www.dgterritorio.pt/cartografia_e_geodesia/cartografia/carta_administrativa_oficial_de_portugal_caop/caop_em_vigor/

Anexos

**Anexo 1 - Modelo digital de terreno para o Concelho de Almada e
mapa de declives**

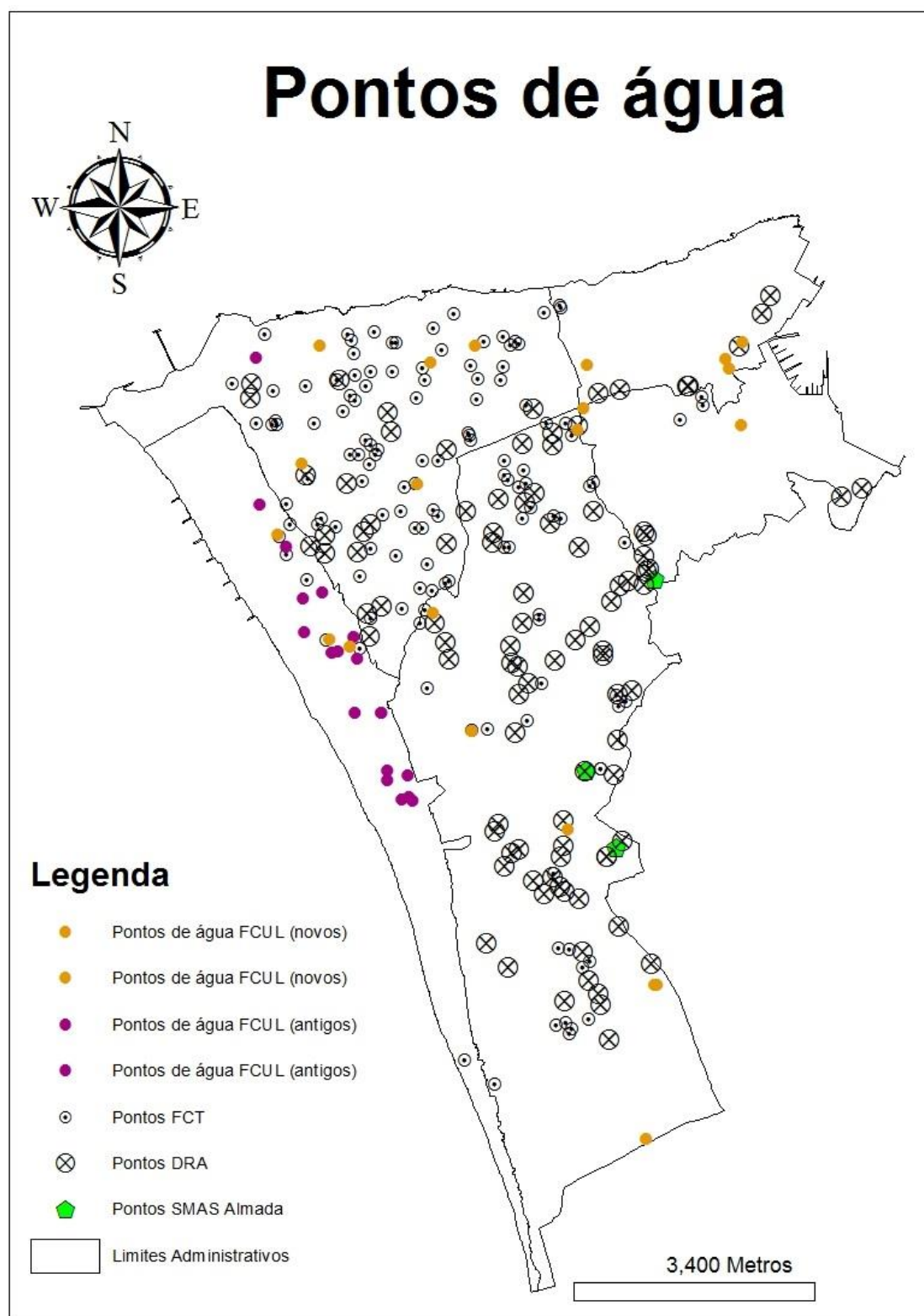


Mapa de Declives

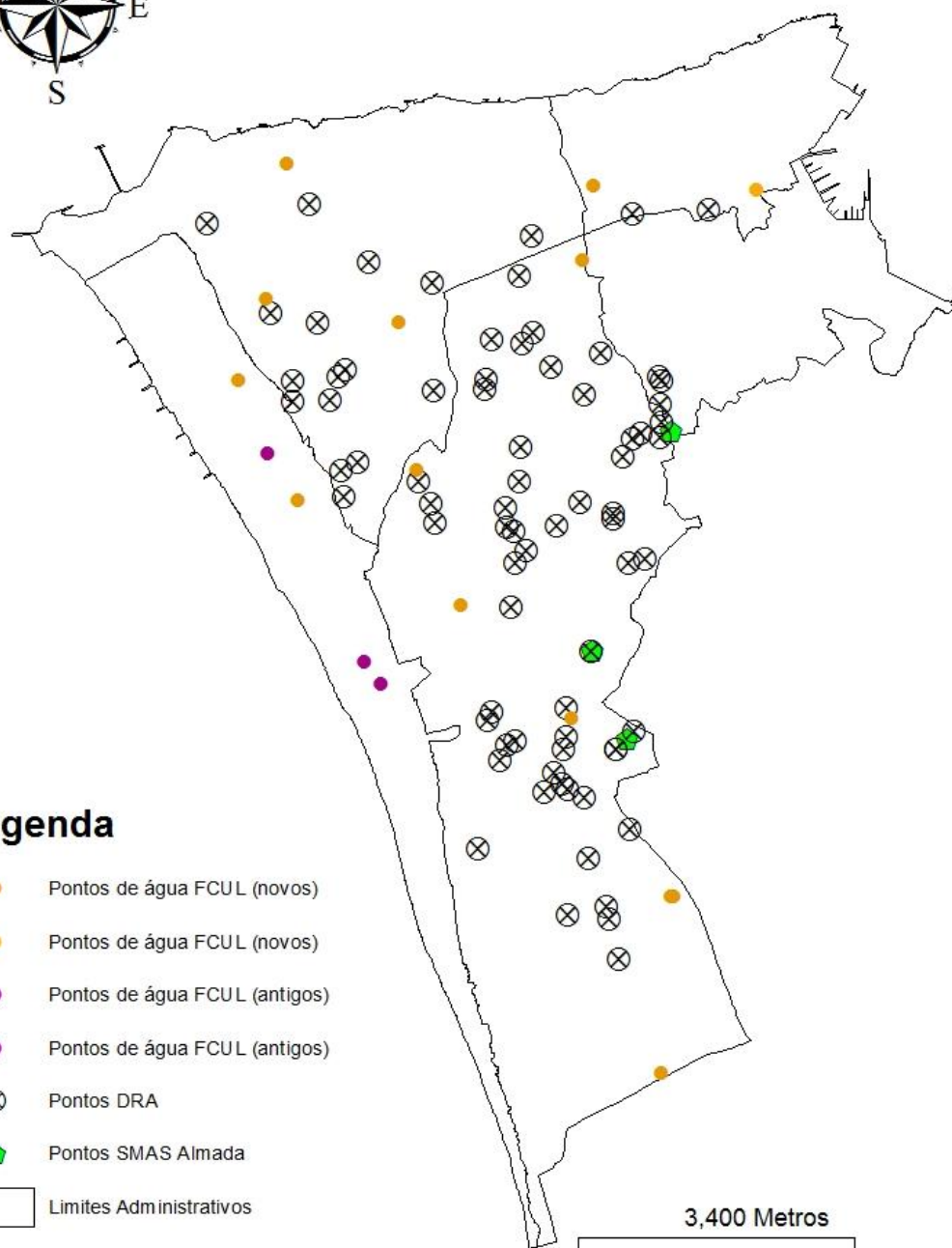


3,400 Metros

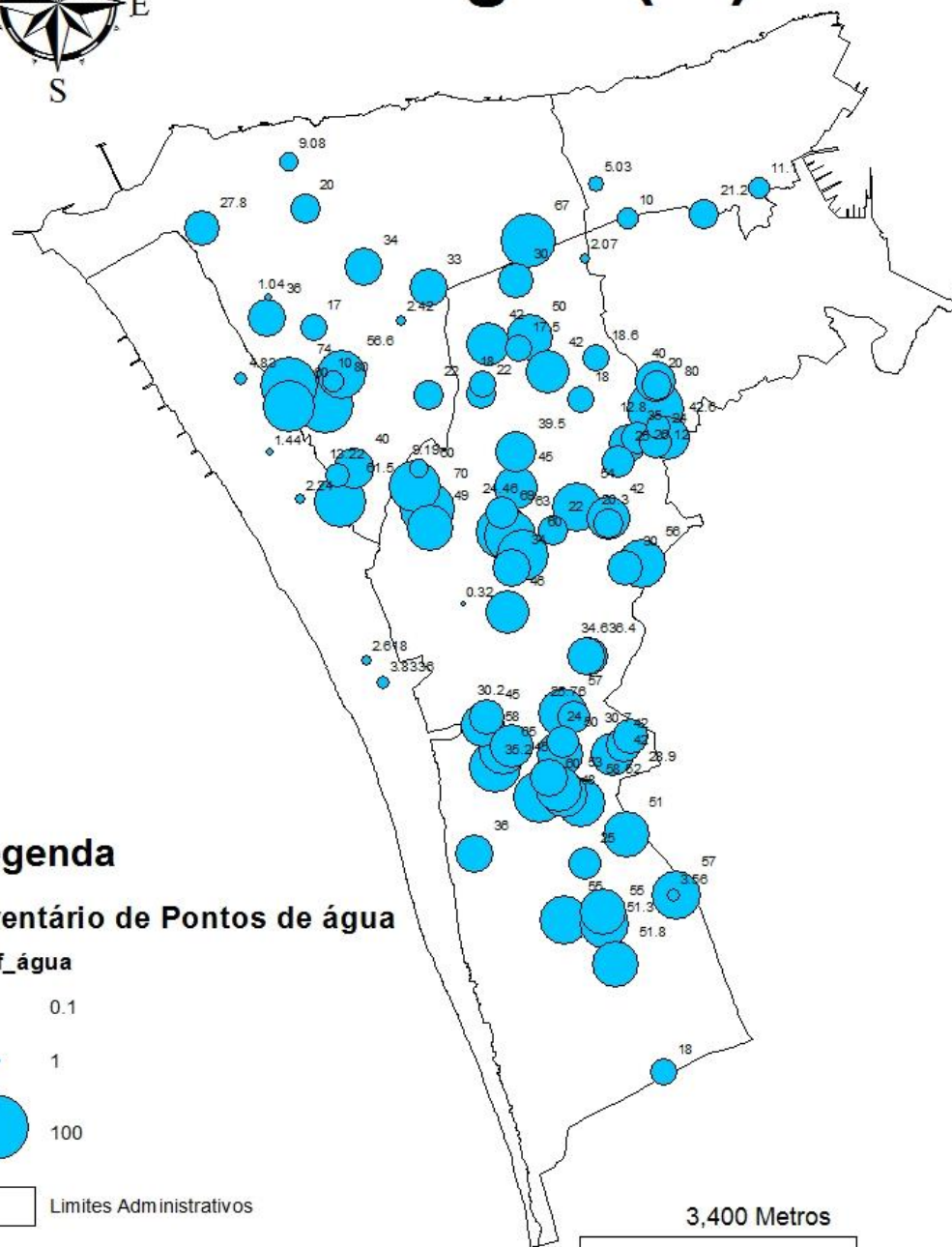
Anexo 2 - Inventário de pontos de água e pontos de água com informação relevante e distribuição da profundidade do nível da água no Concelho de Almada



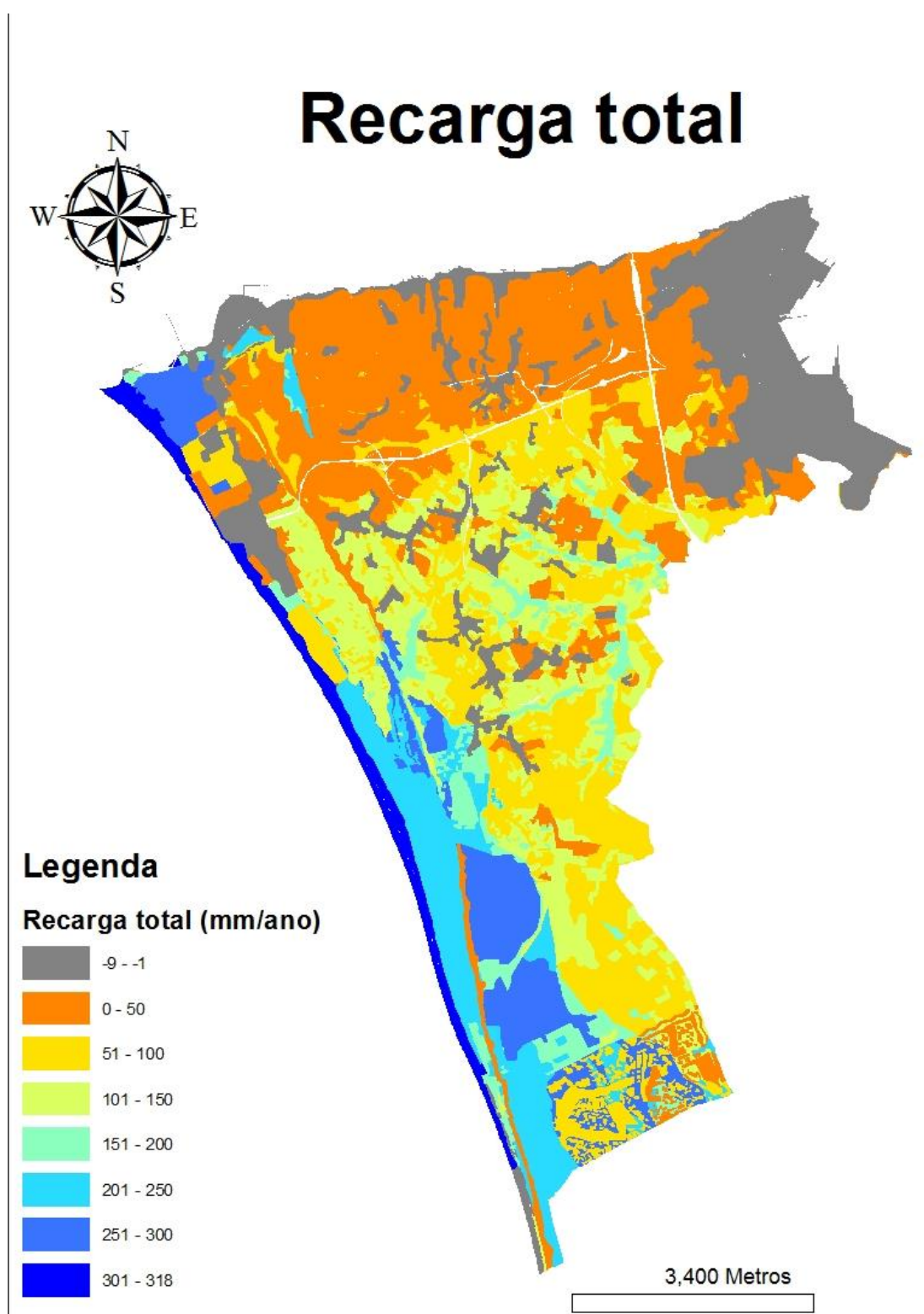
Pontos de água com informação relevante



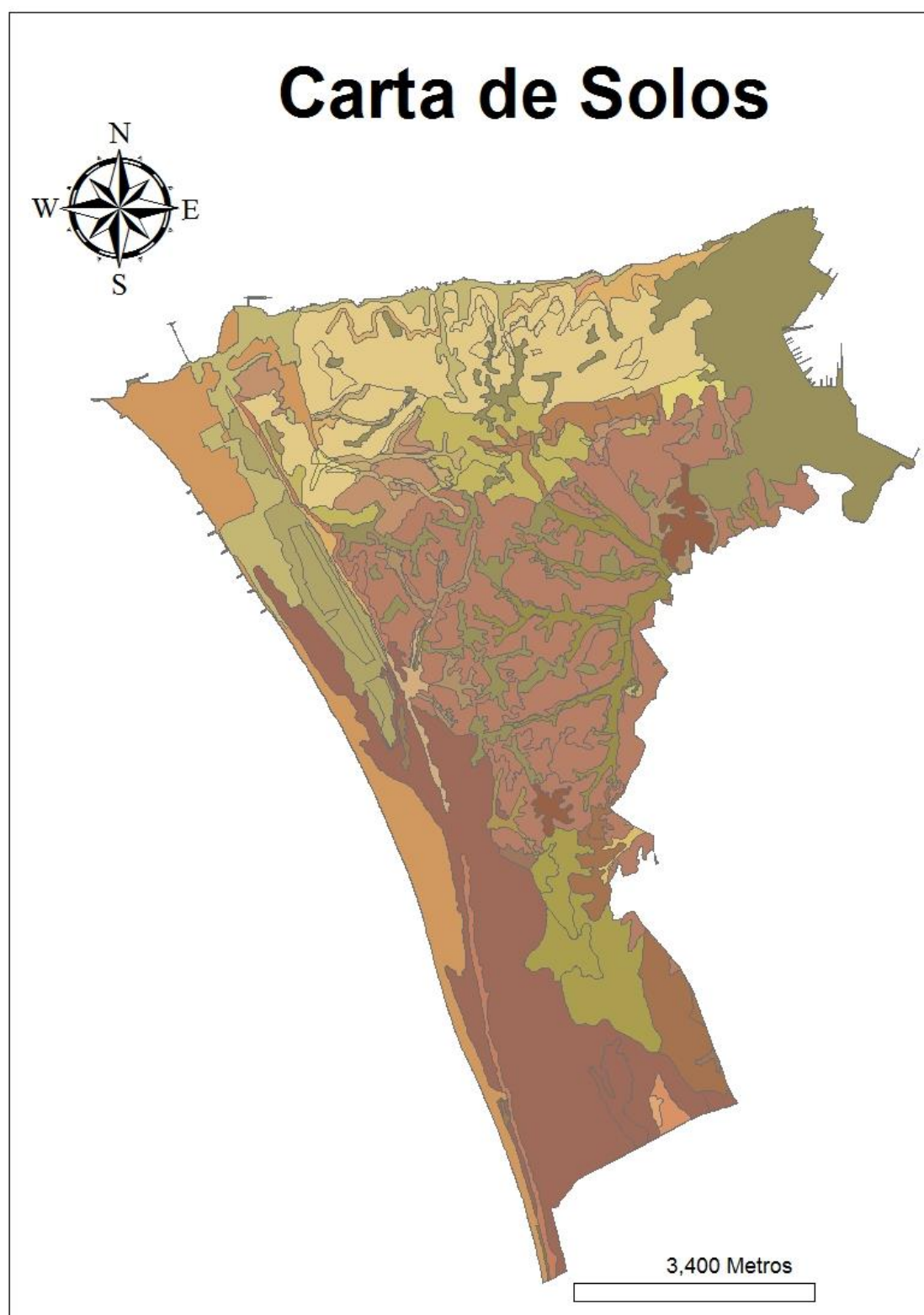
Profundidade do Nível da Água (m)



Anexo 3 - Recarga (datos de base)












Anexo 4 - Carta de solos e respectiva legenda



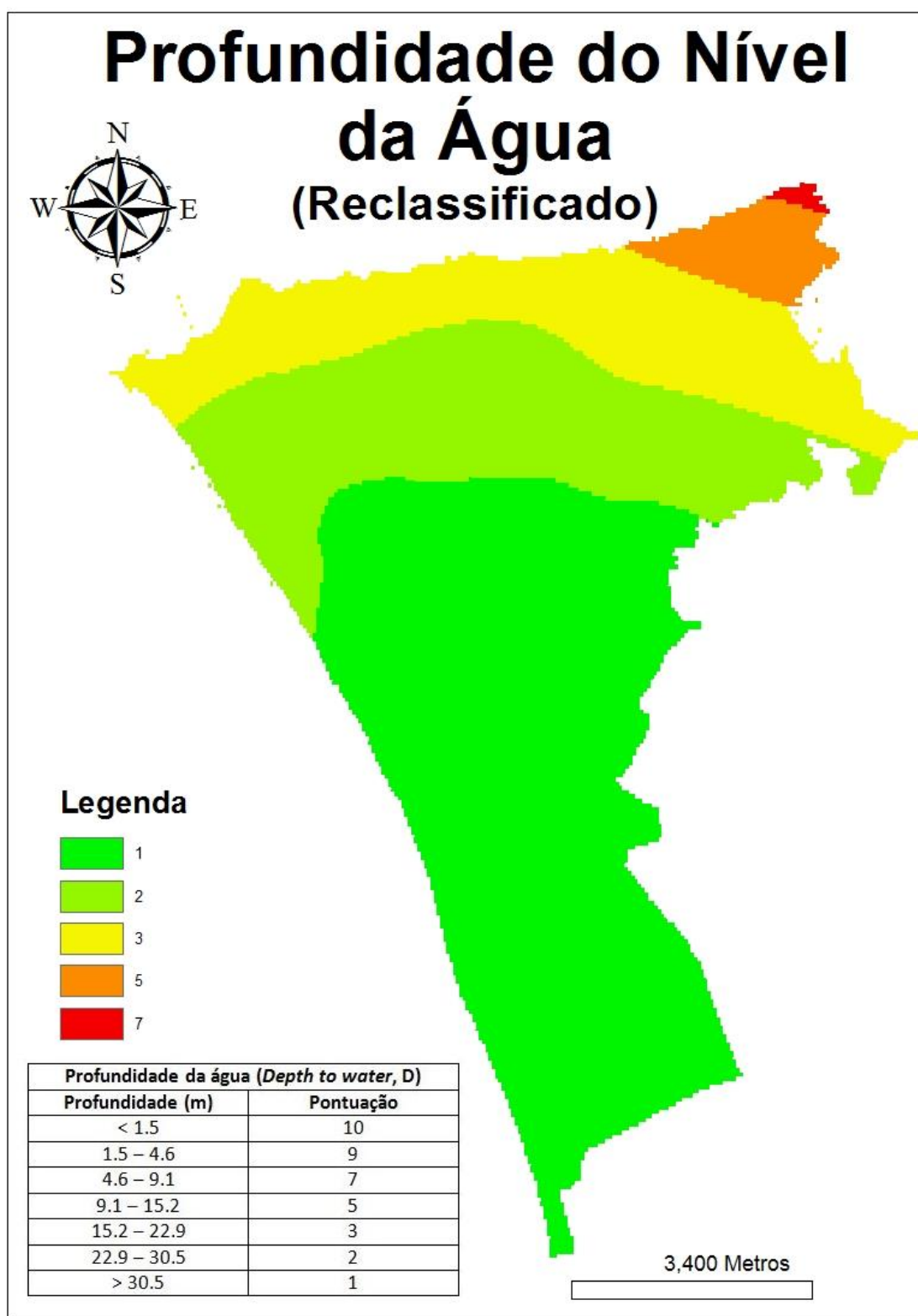
Legenda

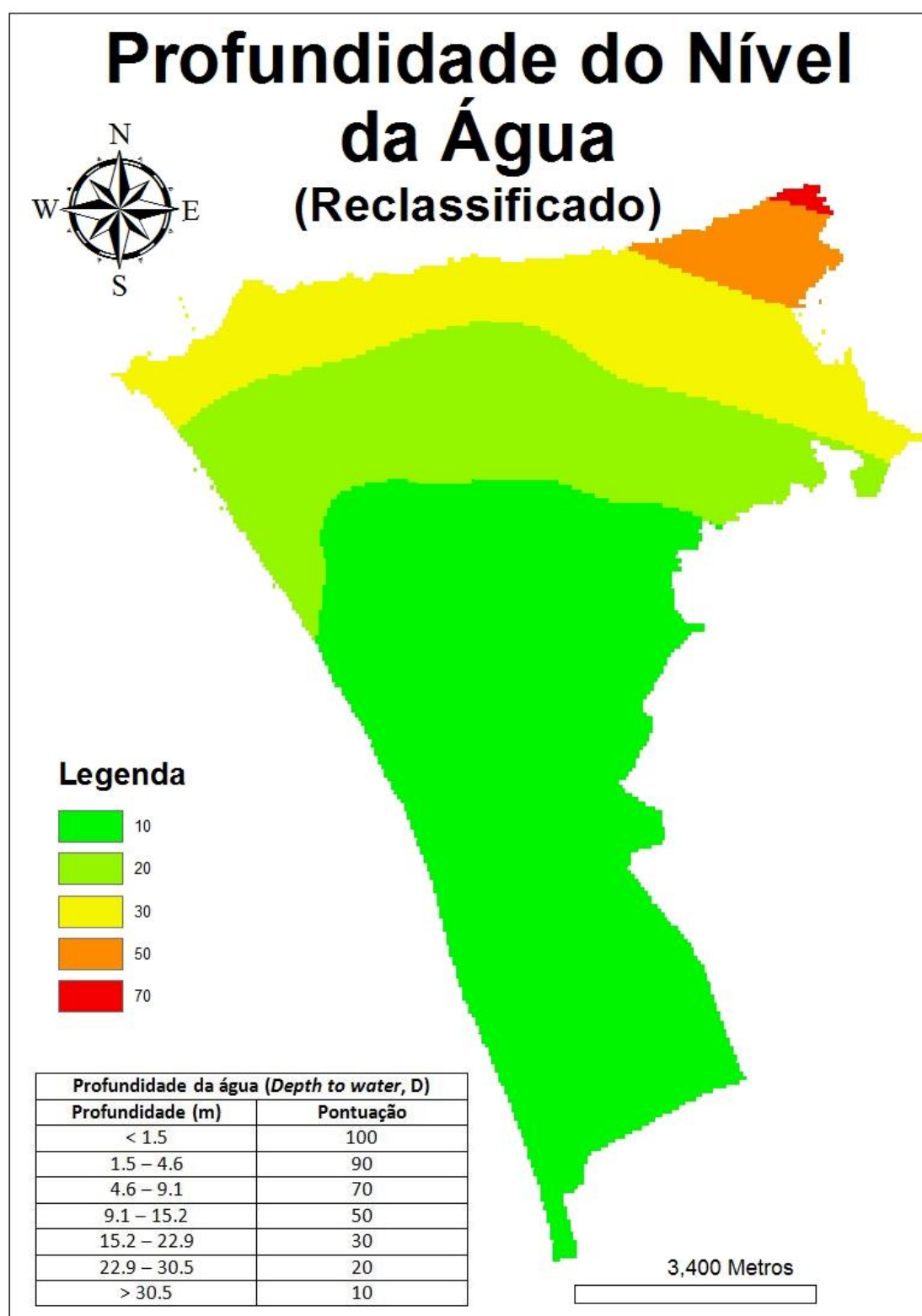
LEGENDA

	Afloramentos Rochosos de Arenitos
	Aluviosolos Modernos Calcários
	Aluviosolos Modernos Não Calcários
	Litossolos (Solos Esqueléticos) dos Climas Sub-Húmidos e Semi-Áridos de Arenitos
	Regossolos dos Climas Sub-Húmidos e Semi-Áridos Psamíticos Para-Hidromórficos húmidos cultivados
	Regossolos dos Climas Sub-Húmidos e Semi-Áridos Psamíticos não húmidos
	Regossolos dos Climas Sub-Húmidos e Semi-Áridos Psamíticos não húmidos (retificado 20 Maio 2013)
	Solos Calcários Pardos dos Climas Sub-Húmidos e Semi-Áridos Normais de arenitos finos calcários (retificado 20 Maio 2013)
	Solos Calcários Pardos dos Climas Sub-Húmidos e Semi-Áridos Normais de arenitos finos micáceos
	Solos Calcários Pardos dos Climas Sub-Húmidos e Semi-Áridos de Margas
	Solos Calcários Pardos dos Climas Sub-Húmidos e Semi-Áridos de Margas (retificado 20 Maio 2013)
	Solos Calcários Pardos dos Climas Sub-Húmidos e Semi-Áridos de Margas em fase agropédica
	Solos Calcários Pardos dos Climas Sub-Húmidos e Semi-Áridos de Margas em fase delgada
	Solos Halomórficos - Hidromórficos Sem Horizonte Eluvial Para-Aluviosolos (ou Para-Coluviosolos) de Aluviões ou Coluviais de textura ligeira
	Solos Halomórficos -Salinos de Salinidade Elevada de Aluviões de textura pesada, fase mal drenada e inundável
	Solos Litólicos Não Húmicos dos Climas Sub-Húmidos e Semi-Áridos Normais de Arenitos Grosseiros
	Solos Litólicos Não Húmicos dos Climas Sub-Húmidos e Semi-Áridos Normais de materiais arenáceos pouco consolidados
	Solos Litólicos Não Húmicos dos Climas Sub-Húmidos e Semi-Áridos Normais de materiais arenáceos pouco consolidados (retificado 20 Maio 2013)
	Solos Litólicos Não Húmicos dos Climas Sub-Húmidos e Semi-Áridos Normais de arenitos finos micáceos
	Solos Podzolizados Podzois Hidromórficos Com Surraipa de areias ou arenitos
	Solos Podzolizados Podzois Não Hidromórficos Com Surraipa de areias ou arenitos
	Solos Podzolizados Podzois Não Hidromórficos Com Surraipa de materiais arenáceos pouco consolidados
	Solos Podzolizados Podzois Não Hidromórficos Com Surraipa de ou sobre arenitos
	Solos Podzolizados Podzois Não Hidromórficos Sem Surraipa de areias ou arenitos
	Solos de Baixas (Coluviosolos) Calcários (Para-Solos Calcários) de textura ligeira
	Solos de Baixas (Coluviosolos) Calcários (Para-Solos Calcários) de textura mediana
	Solos de Baixas (Coluviosolos) Não Calcários de textura ligeira
	Solos de Baixas (Coluviosolos) Não Calcários de textura ligeira em fase mal drenada
	Solos de Baixas (Coluviosolos) Não Calcários de textura mediana
	Área Social
	Área Social (retificado 20 Maio 2013)

Anexo 5 - Resultados: Profundidade do Nível da Água

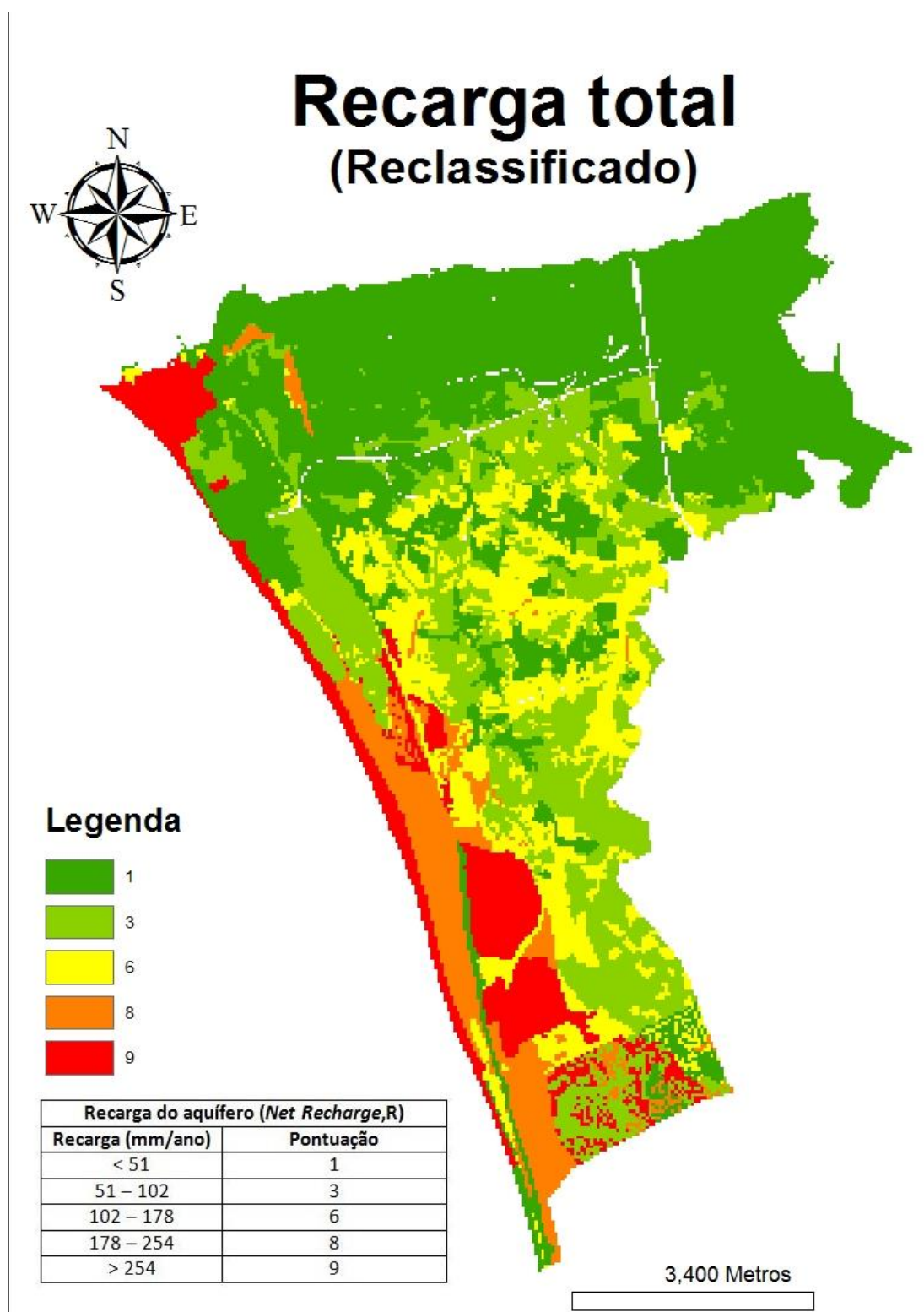
DRASTIC (Aller, L., et al, 1987) e IS (Ribeiro, L., 2005)

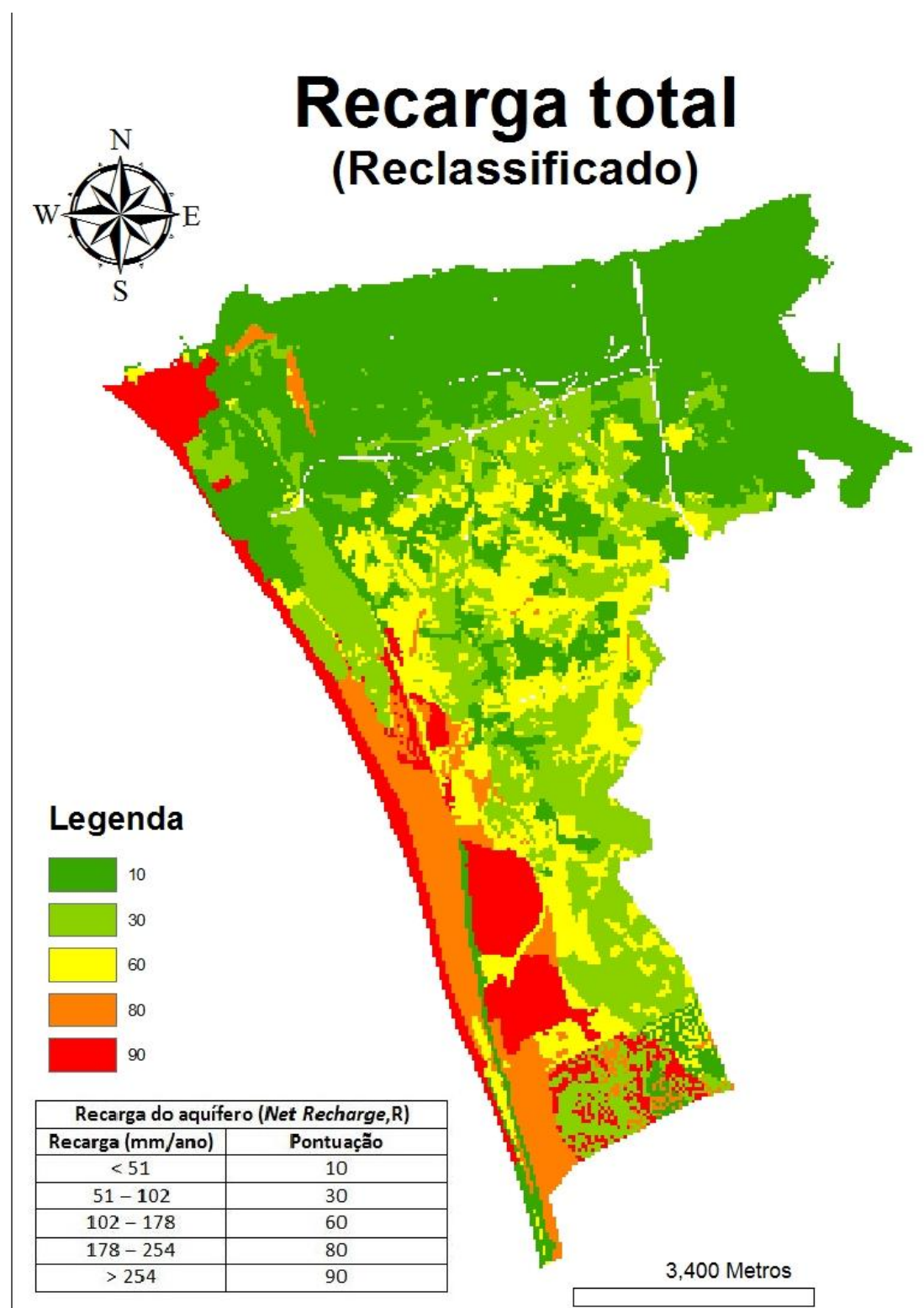




Anexo 6 - Resultados: Recarga

DRASTIC (Aller, L., et al, 1987) e IS (Ribeiro, L., 2005)

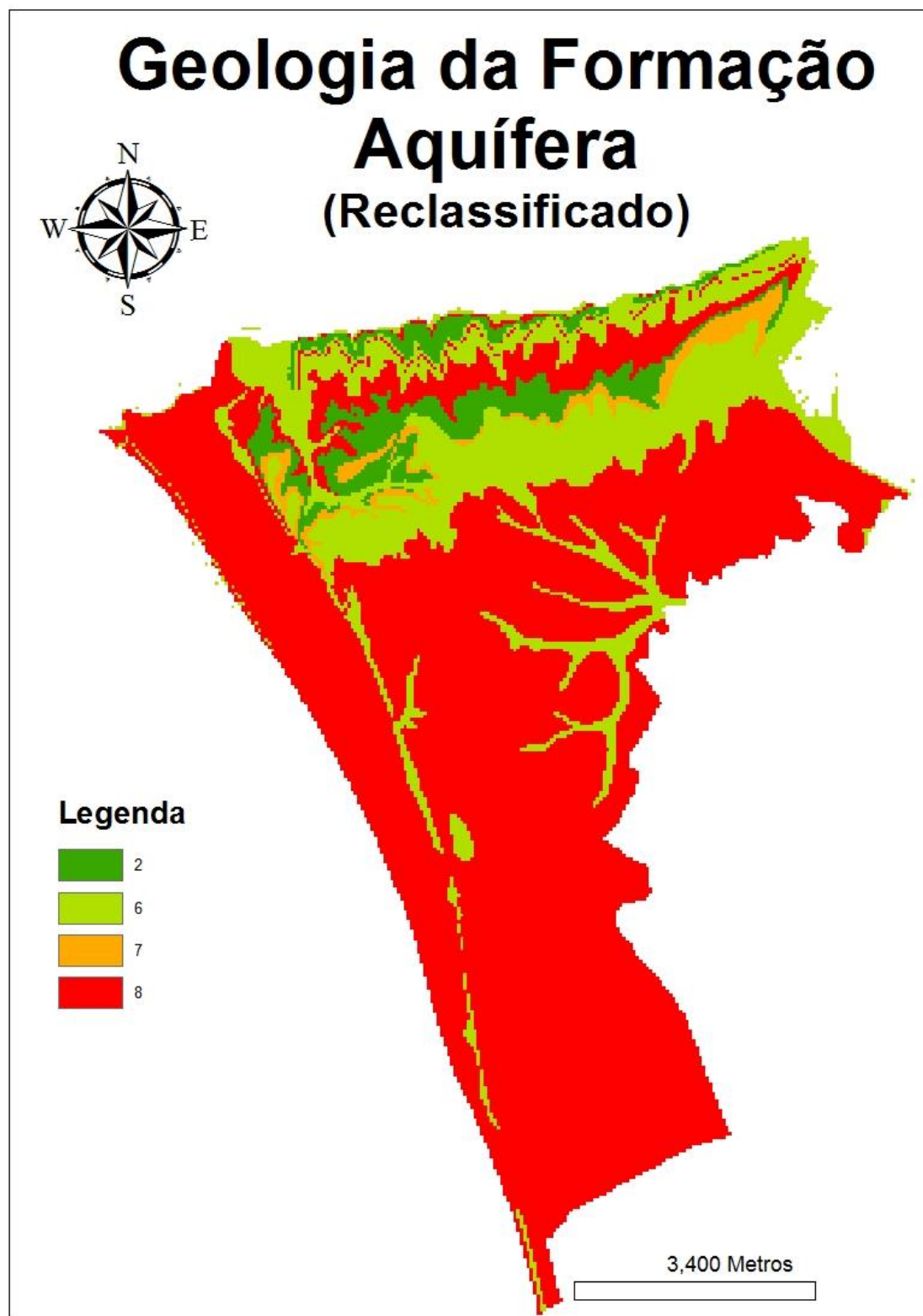


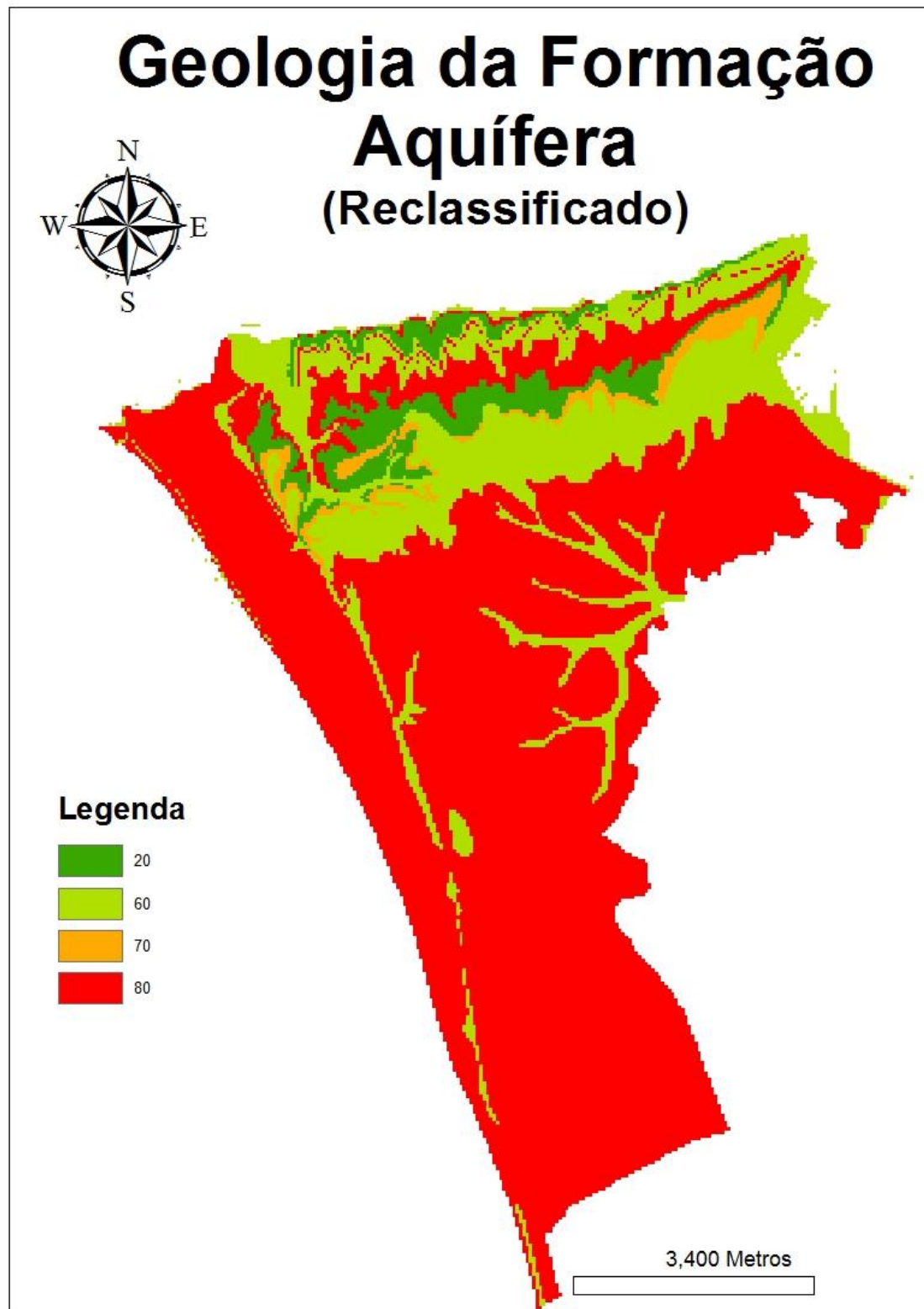


Anexo 7 - Resultados: Geologia da Formação Aquífera

DRASTIC (Aller, L., *et al*, 1987) e IS (Ribeiro, L., 2005)

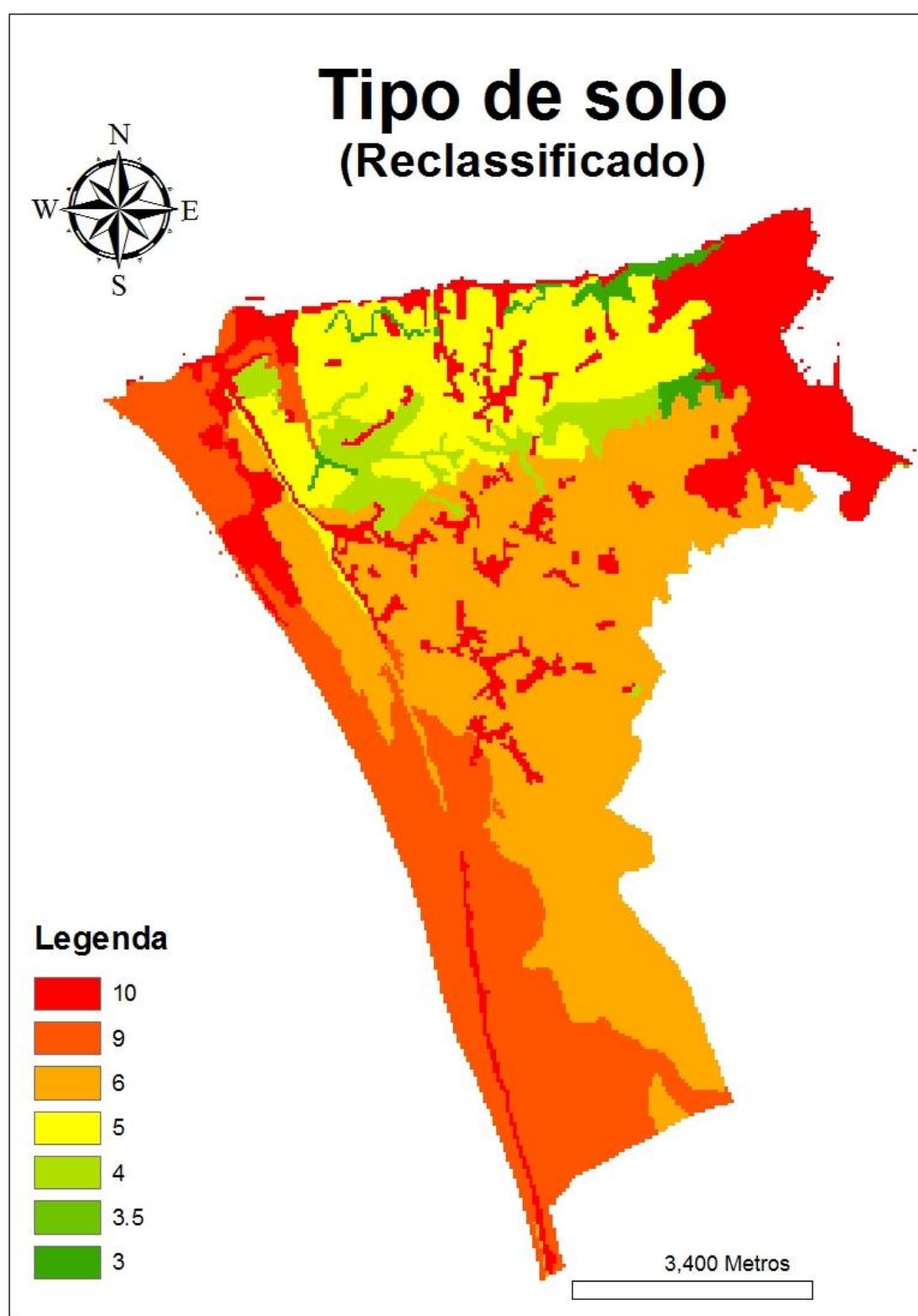
- Tabela de reclassificação no capítulo 3





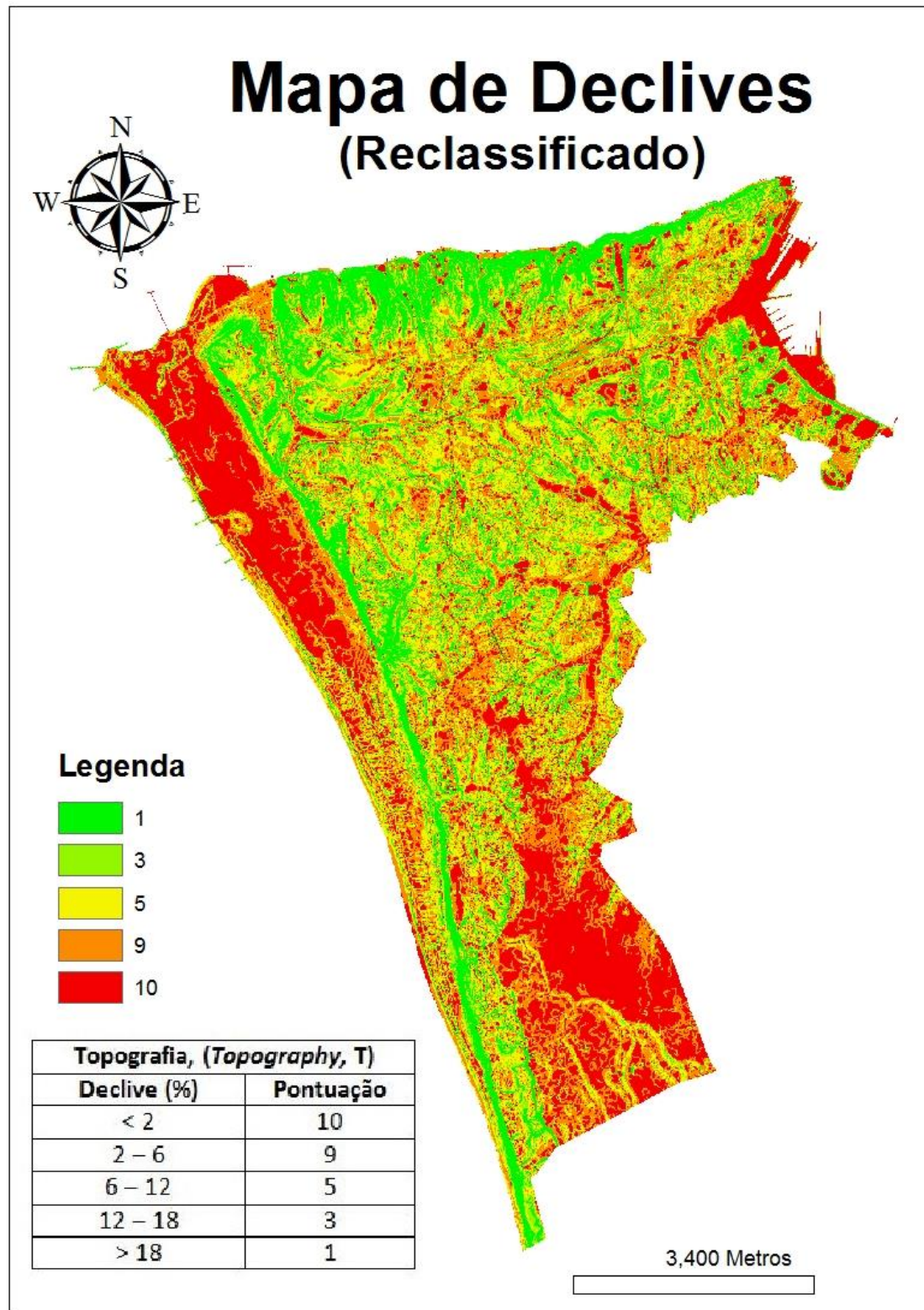
Anexo 8 - Resultados: Tipo de solo

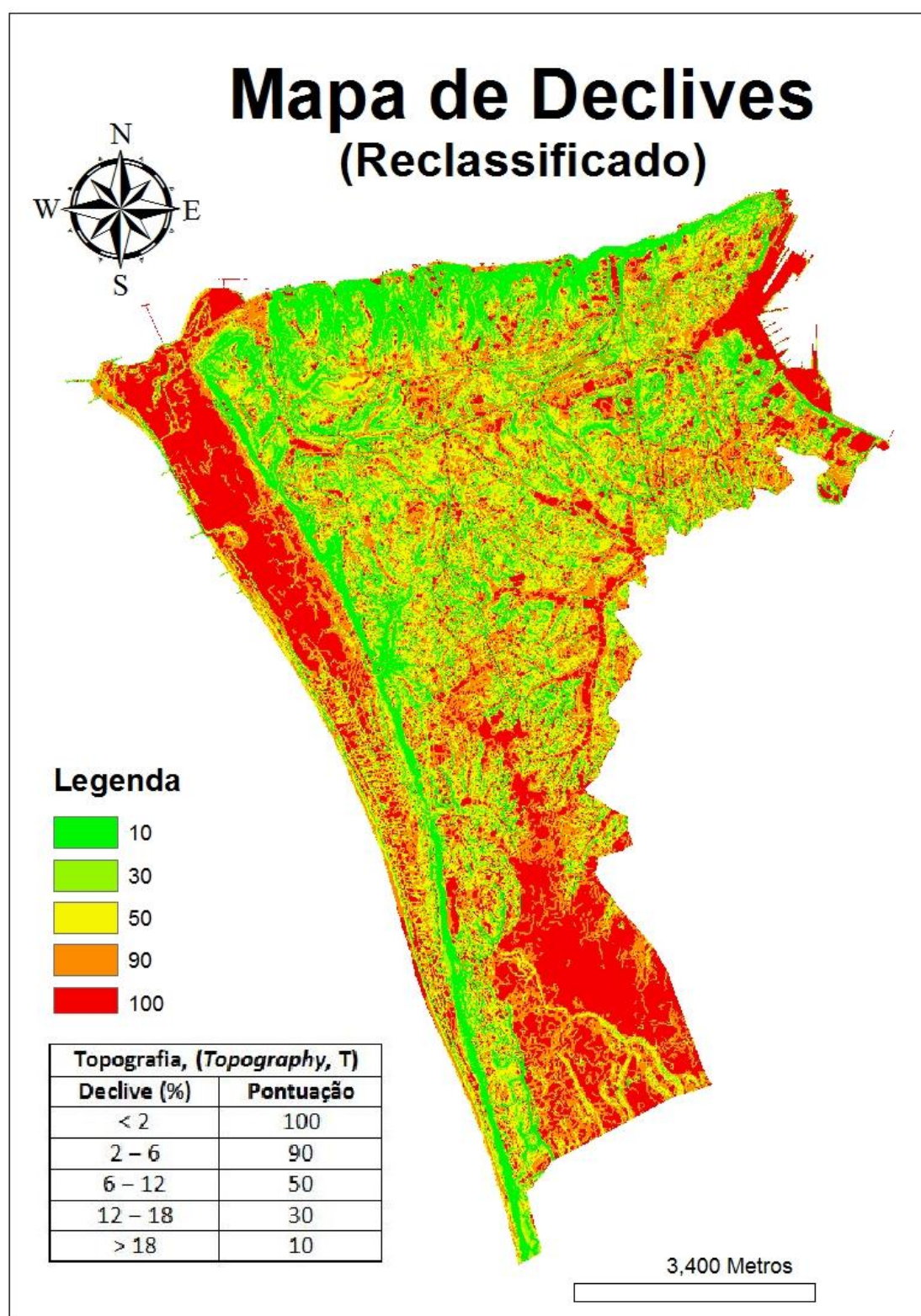
DRASTIC (Aller, L., *et al*, 1987) - Tabela de reclassificação no capítulo 3



Anexo 9 - Resultados: Topografia (declives)

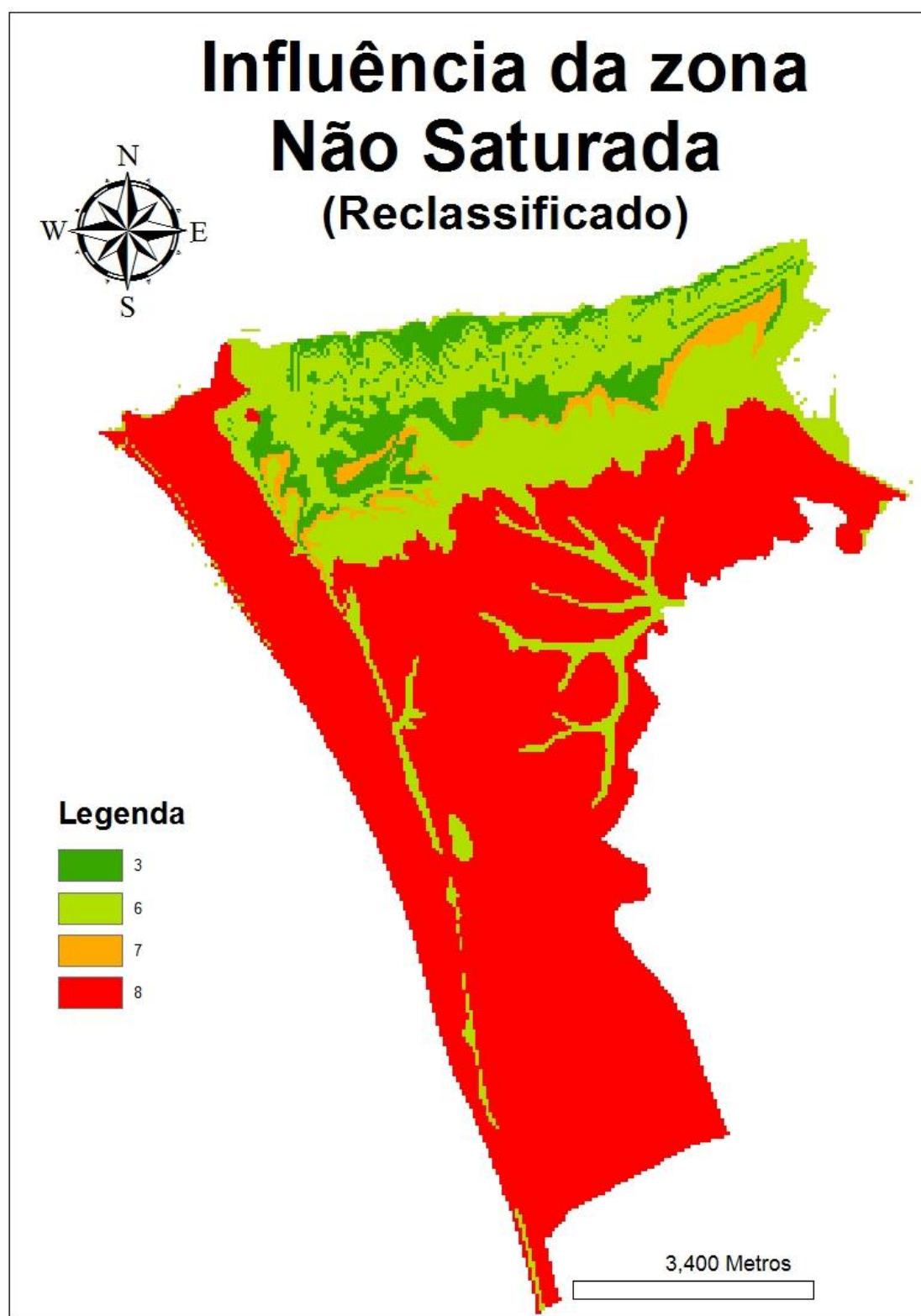
DRASTIC (Aller, L., et al, 1987) e IS (Ribeiro, L., 2005)





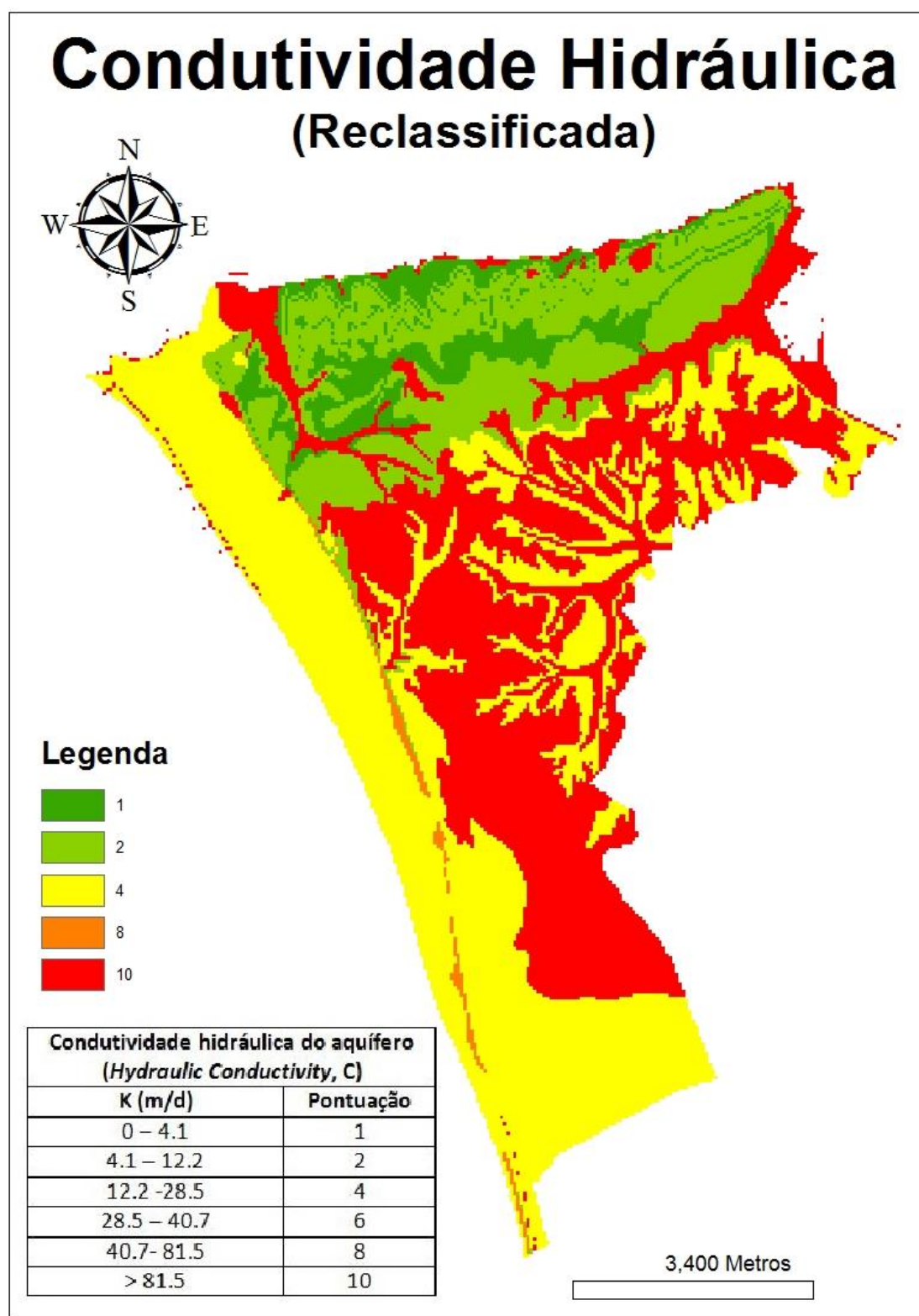
Anexo 10 - Resultados: Influência da Zona Vadosa

DRASTIC (Aller, L., et al, 1987) - Tabela de reclassificação no capítulo 3



Anexo 11 - Resultados: Condutividade Hidráulica

DRASTIC (Aller, L., et al, 1987)



Anexo 12 - Resultados: Uso do solo

IS (Ribeiro, L., 2005) - Tabela de reclassificação no capítulo 3

